

УДК 621.313.282.2

**РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ В ИМПУЛЬСНОМ ЛИНЕЙНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ  
ПРИВОДЕ СКВАЖИННОГО ВИБРОИСТОЧНИКА**

**Б. Ф. Симонов<sup>1</sup>, А. О. Кордубайло<sup>1</sup>, В. Ю. Нейман<sup>2</sup>, А. Е. Полищук<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: Simonov\_BF@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*  
<sup>2</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
E-mail: nv.nstu@ngs.ru, просп. Карла Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия*

Представлены экспериментальные исследования рабочих процессов в линейном электромагнитном двигателе в составе скважинного импульсного виброисточника. На основании полученных результатов сформулированы требования к их конструированию и рекомендации к выбору основных геометрических соотношений.

*Скважинный виброисточник, электромагнитный двигатель ударного действия, энергия и частота ударов, механическая мощность*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180109

Одна из важнейших задач, решаемых при добыче нефти, — повышение нефтеотдачи пластов. Среди многих методов ее решения наиболее перспективны виброволновые. С их помощью можно воздействовать как на призабойную зону скважины, так и в целом на пласт, они могут сочетаться со всеми остальными известными методами повышения нефтеотдачи. В связи с этим создание технических средств (виброисточников), позволяющих осуществлять виброволновое воздействие на нефтяные пласты и призабойную зону скважин, является актуальной задачей, требующей дальнейшего совершенствования [1, 2].

Большую эффективность показали методы воздействия на пласт поверхностными виброисточниками, испытанные на нефтяных месторождениях Тюмени, Урала и Поволжья в 90-е годы XX в. [3, 4]. Однако широкого применения они не нашли из-за громоздкости оборудования и сложности его эксплуатации. В настоящее время наиболее интенсивно развиваются скважинные виброисточники [5, 6].

Перспективным оказалось создание скважинных виброисточников на основе электромагнитного двигателя ударного действия в качестве линейного импульсного привода с гидравлическим силовым элементом. Последний преобразует осевые перемещения штока, по которому наносится удар, в радиальные распорных элементов, воздействующих через колонну обсадных труб в скважине на нефтяной пласт. При этом на конструкцию и работу двигателя и силового элемента накладывается ряд ограничений, связанных с размерами скважины. Во-первых, двигатель должен при требуемой энергии удара ( $A_{уд} = 150 - 200$  Дж) обладать достаточно малым внешним диаметром  $R_2$  ( $2R_2 \leq 110 - 115$  мм), а во-вторых, работать при высоких коэффициентах отскока бойка (до  $K_0 = 0.85 - 0.95$ ). Для достижения такой энергии при ограниченных ради-

альных размерах необходимо увеличивать рабочий ход бойка. Поскольку это связано с длиной катушек электромагнитов, в создаваемых двигателях должно соблюдаться условие  $L_k / R_1 > 12$ , где  $L_k$  — длина катушки;  $R_1$  — радиус поперечного сечения бойка. В [7, 8] описаны особенности проектирования таких приводов, а в настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования протекающих динамических процессов и дана оценка их влияния на конструкцию электромагнитного двигателя.

Исследования проводились на стенде (рис. 1) с силовым элементом и электромагнитным двигателем ударного действия. Двигатель выполнен по конструктивной схеме электромагнитного молота двойного действия и состоит из двух катушек — холостого 1 и рабочего 2 хода, находящихся каждая в своем корпусе с фланцами, соединенными между собой звеном 3. Внутри катушек по направляющей перемещается боек 4, совершающий под действием электромагнитных сил возвратно-поступательное движение и в конце каждого цикла наносящий удар по штоку 5 силового элемента 6. При выбеге вверх боек тормозится силой тяжести и электромагнитной силой катушки рабочего хода. Высоту  $H$  (длину хода бойка) можно регулировать перемещением отбойника 7. Управление переключением катушек обеспечивают датчики положения 8, 9, расположенные на торцах электромагнитных катушек 1, 2.

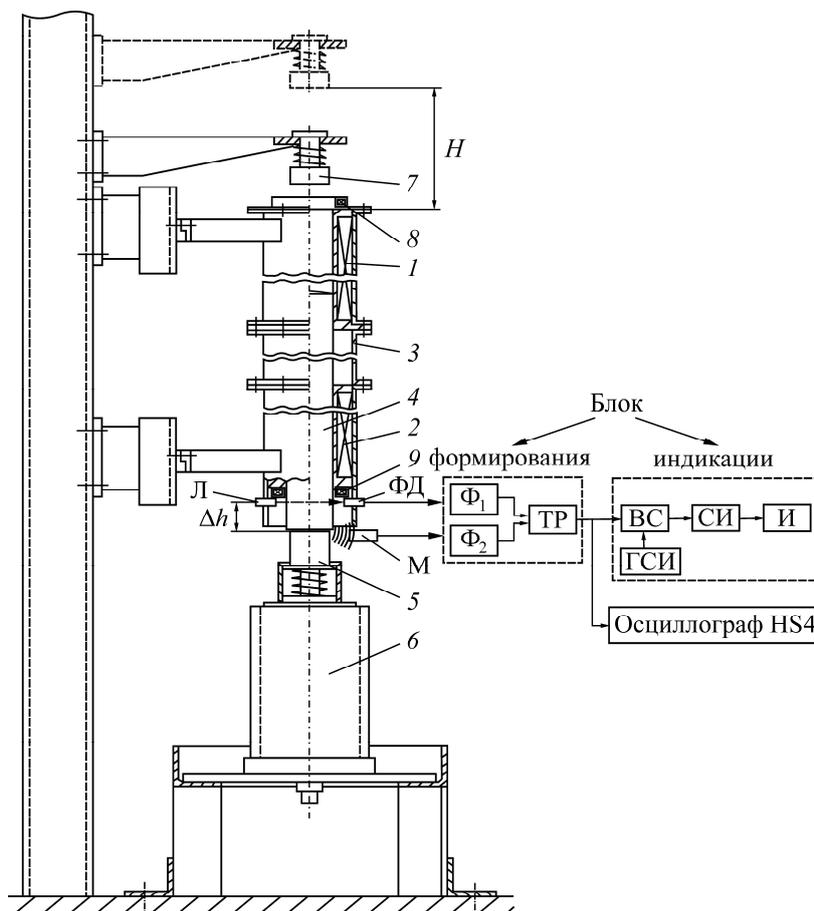


Рис. 1. Стенд с силовым элементом и электромагнитным двигателем ударного действия

Работа катушек осуществляется с помощью схемы питания и управления (рис. 2). Данная схема представляет собой тиристорный триггер с искусственной коммутацией электромагнитных катушек  $L_1, L_2$  за счет коммутирующей емкости  $C_3$  и гашения остаточной энергии от-

ключаемых электромагнитных катушек на элементах гашения  $R_2C_2$ . Переключение катушек выполняют датчики положения  $L_3, L_4$ . Запуск производится кнопкой “Пуск”  $SB_1$  [9]. Регулирование напряжением обеспечивается автотрансформатором Т через трехфазный выпрямительный мост  $VD_1 - VD_6$ .

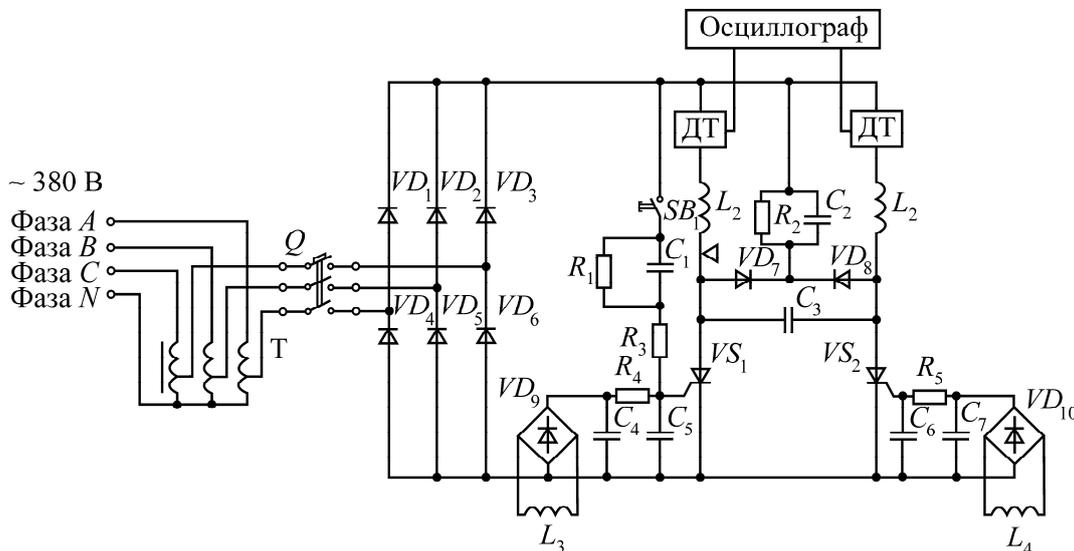


Рис. 2. Схема питания и управления электромагнитным двигателем ударного действия

Измерение скорости бойка в момент удара проводилось на этом же стенде (рис. 1) следующим образом. В нижней части корпуса молота имеются два сквозных отверстия напротив друг друга. В одно отверстие установлен лазер Л, в другое — фотодиод ФД, которые в паре образуют оптический датчик. В непосредственной близости к точке удара бойка по пульсатору смонтирован микрофон М. Сигналы от оптического датчика и микрофона поступают в блок формирования, включающий формирователи импульсов  $\Phi_1, \Phi_2$  и триггер ТР. Выходной сигнал формирователя записывается на осциллограф, а его длительность непосредственно отображается с помощью блока индикации, в котором расположены временной селектор ВС, генератор счетных импульсов ГСИ, счетчик импульсов СИ и индикатор И. Описанная схема позволяет отследить интервал времени  $\Delta t$  от момента прохождения бойка мимо оптического датчика до точки удара по плунжеру. Зная базовое расстояние  $\Delta h$ , можно получить значение скорости в момент удара  $V_{уд} = \Delta h / \Delta t$ .

Исследование динамических характеристик выполнялось на двух образцах электромагнитного двигателя одинаковой конструкции, представленной на рис. 1, со значениями параметров, отраженными в табл. 1 ( $R_1$  — радиус бойка,  $2R_2$  — внешний диаметр корпуса,  $m_б$  — масса бойка).

ТАБЛИЦА 1. Конструктивные параметры электромагнитного двигателя

Параметр	$L_k$ , мм	$L_б$ , мм	$R_1$ , мм	$2R_2$ , мм	$L_k/R_1$	$m_б$ , кг
Вариант исполнения 1	278	356	24	95	11.58	4.9, 7.8, 11.8, 13.6
Вариант исполнения 2	605	1030	25	108	24.20	11.2, 13.5, 14.2, 20.0

Статические тяговые характеристики электромагнитов этих двигателей  $F_3(i, \delta)$ , рассчитанные по программе FEMM [10, 11], и экспериментальные приведены на рис. 3. Видно, что при допустимых плотностях тока в импульсе ( $i \leq 5 \text{ A/mm}^2$ ) амплитуда импульса тока не превышает 40–50 А, а сила тяги электромагнитов в 2–3 раза превышает массу используемых бойков  $F_3 \geq G_6$ . Это накладывает определенные особенности на рабочий цикл двигателей.

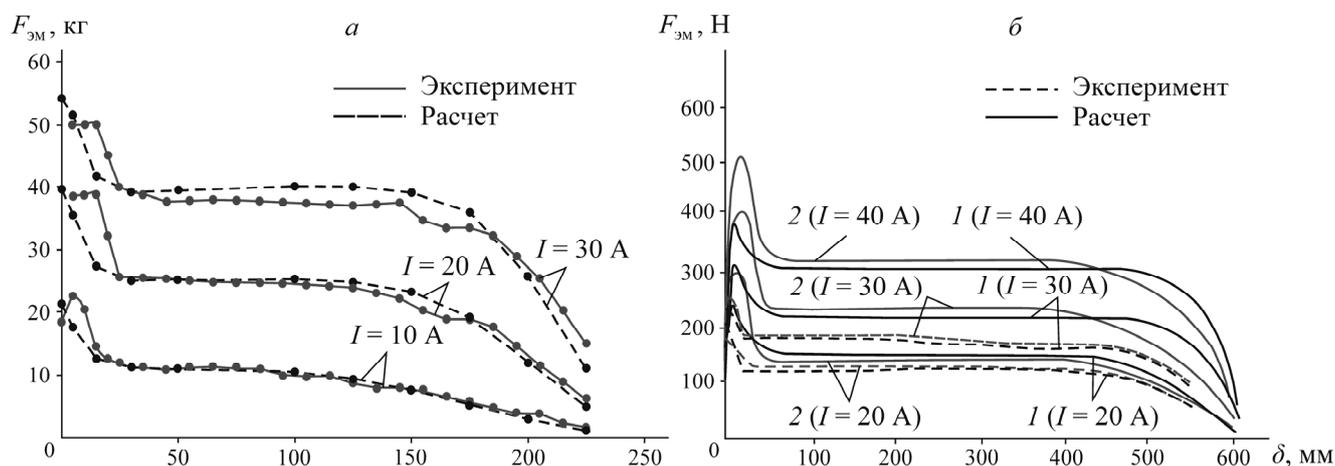


Рис. 3. Зависимость электромагнитной силы  $F(I, \delta)$  от тока  $i$  и зазора  $\delta$  электромагнитов различных вариантов двигателей: *a* — вариант 1 ( $L_k = 268 \text{ мм}$ ,  $R_1 = 24 \text{ мм}$ ,  $W = 989$  витков,  $S_{пр} = 2 \text{ мм}^2$ ); *б* — вариант 2 (1 — боек с малым отверстием  $d = 10 \text{ мм}$ , 2 — сплошной боек,  $L_k = 605 \text{ мм}$ ,  $R_1 = 25 \text{ мм}$ ,  $W = 1390$  витков,  $S_{пр} = 4.4 \text{ мм}^2$ );  $S_{пр}$  — площадь сечения провода

При таком режиме возможен большой выбег бойка при холостом ходе, если его не ограничивать отбойником, поэтому в испытательный стенд (рис. 1) включен отбойник  $\delta$ , который может устанавливаться на регулируемом расстоянии  $H$  от верхнего полюса катушки холостого хода электромагнитного двигателя. При испытаниях величина  $H$  принимала следующие значения:  $H = \infty$  (отбойник отсутствует);  $H = 138 \text{ мм}$  (отбойник в верхнем положении);  $H = 20 \text{ мм}$  (отбойник в нижнем положении), в непосредственной близости от полюса.

На электромагнитном двигателе, выполненном по варианту 1, проведены исследования, позволившие установить влияние на рабочий процесс электромагнитного двигателя хода бойка при его постоянной массе за счет изменения положения отбойника и массы бойка  $m_6$  при отсутствии отбойника.

На рис. 4 показаны осциллограммы рабочих процессов в электромагнитном двигателе, выполненном по варианту 1, с бойком массой  $m_6 = 4.8 \text{ кг}$  без отбойника (рис. 4*а*) и при наличии отбойника в нижнем положении (рис. 4*б*) на расстоянии  $H = 20 \text{ мм}$  от верхнего полюса. Сравнение этих осциллограмм позволяет заключить, что когда отбойник отсутствует ( $H = \infty$ ) при выбеге бойка вверх при холостом ходе, происходит выход бойка за пределы катушки рабочего хода и протекание тока в ней при отсутствии бойка, а значит, и отсутствии ЭДС движения. В этом случае ток в рабочей катушке  $i_2$  стабилизируется, достигая больших значений (рис. 4*а*). При  $H = 20 \text{ мм}$  нижний торец бойка никогда не выходит за пределы катушки рабочего хода, а ток  $i_2$  (рис. 4*б*) после резкого нарастания при включении начинает спадать до самого момента удара. В табл. 2 приведены результаты обработки осциллограмм рабочих процессов данного двигателя.

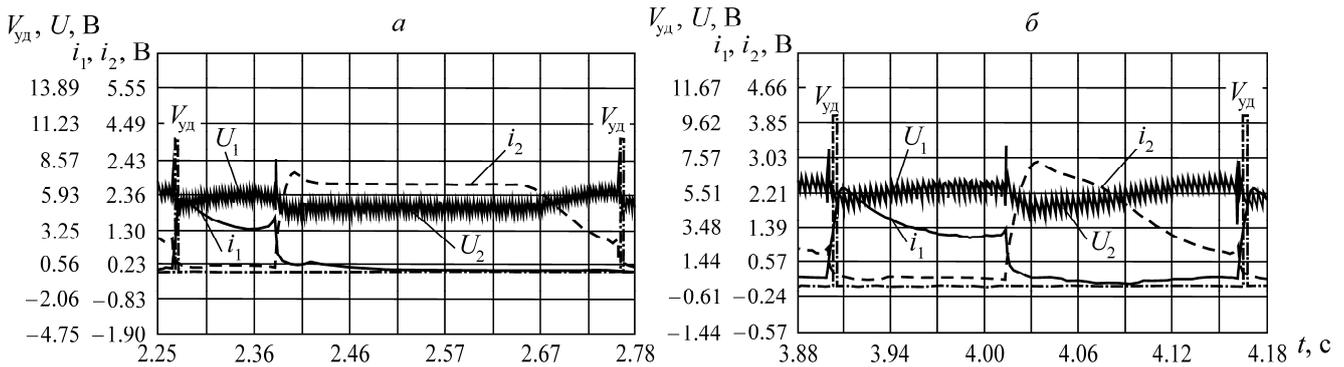


Рис. 4. Осциллограмма рабочего процесса для варианта 1 электромагнитного двигателя с бойком массой 4.8 кг, напряжением на катушках 65 В: а — при отсутствии отбойника ( $H = \infty$ ); б — при нахождении отбойника в нижнем положении  $H = 20$  мм ( $U_1, i_1; U_2, i_2$  — соответственно напряжения и токи катушек холостого и рабочего хода)

ТАБЛИЦА 2. Результаты обработки осциллограмм рабочих процессов двигателя, выполненного по варианту 1

$H$ , мм	$m_6$ , кг	$V_{уд}$ , м/с	$i_{1max}$	$i_{2max}$	$W_1$	$W_2$	$W_{\Sigma}$	$A_{уд}$	$T_{уд}$ , с	$f_{уд}$ , Гц	$\eta$ , %	$\delta_{max}$ , мм	$P_{мех}$ , Вт
			А										
$\infty$	4.8	4.88	21.04	28.00	94.45	404.98	499.43	57.87	0.48	2.07	11.59	430	119.56
138	4.8	4.83	23.19	28.65	96.74	117.84	214.58	56.71	0.38	2.65	26.43	359	150.28
20	4.8	4.78	22.50	27.60	90.61	114.31	204.92	55.63	0.26	3.89	27.15	299	216.40

Примечание.  $V_{уд}, i_{1max}, i_{2max}$  — амплитуды токов холостой и рабочей катушки;  $W_1, W_2, W_{\Sigma}$  — потребляемая энергия холостой, рабочей катушкой и суммарная;  $A_{уд}$  — энергия удара;  $T_{уд}, f_{уд}$  — период и частота ударов;  $\eta$  — КПД;  $\delta_{max}$  — амплитуда хода бойка;  $P_{мех}$  — механическая мощность, передаваемая силовому элементу  $P_{мех} = A_{уд} f_{уд}$  и идущая на излучение

Анализируя данные табл. 2, можно сделать следующие выводы.

Введение ограничителя  $\delta$  выбега бойка вверх и его приближение в верхнему полюсу верхней катушки (рис. 1) позволяет при  $F_3 \gg G_6$  исключить выход бойка за пределы катушки рабочего хода, снизить амплитуду перемещения бойка с 430 до 299 мм, в результате чего:

- почти в 2 раза повышается частота ударов (с 2.07 до 3.89 Гц);
- энергия ударов  $A_{уд}$ , амплитуды токов катушек  $i_{1max}, i_{2max}$ , скорость бойка в момент удара  $V_{уд}$ , энергия, потребляемая катушкой холостого хода бойка  $W_1$ , энергия, потребляемая катушкой рабочего хода  $W_2$ , изменяются незначительно;

— на 60–70 % снижается потребление энергии из сети за счет того, что исключается режим протекания тока в катушке рабочего хода при отсутствии в ней бойка. При этом общий КПД системы  $\eta$  возрастает с 11.59 до 27.15 %;

— за счет повышения частоты ударов  $f_{уд}$  при  $A_{уд} \approx const$  почти в 2 раза увеличивается ударная механическая мощность  $P_{мех}$  с 119 до 216 Вт.

Отсюда следует, что если обеспечивается условие  $F_3 \gg G_6$  и  $K_0 = 0.8 - 0.9$ , то целесообразно в конструкции электромагнитного двигателя для скважинного виброисточника с силовым элементом использовать отбойник сверху или ограничивать вертикальные перемещения бойка таким образом, чтобы он не выходил за пределы катушки рабочего хода, и тем самым повысить энергетические характеристики устройства.

На модели, выполненной по варианту 1, проведены исследования режимов работы двигателя с различными массами бойка  $m_6 = \text{var}$  при отсутствии ограничителя ( $H = \infty$ ). Результаты, представленные в табл. 3, дают возможность сделать следующие выводы:

— поскольку  $F_3 \gg G_6$ , то в динамике амплитуды импульсов тока с ростом массы бойка изменяются незначительно до тех пор, пока не начинает нарушаться данное условие;

— с ростом массы бойка при постоянстве напряжения, подаваемого на катушки, происходит нарушение условия  $F_3 \gg G_6$ . В динамике электромагнитные силы приближаются к массе бойка и он уже не выбегает за пределы катушки рабочего хода. При этом достигается тот же эффект, что и при установке ограничителя хода бойка, в результате чего снижается энергопотребление, повышается КПД и увеличивается ударная механическая мощность.

ТАБЛИЦА 3. Результаты обработки осциллограмм рабочих процессов двигателя, выполненного по варианту 1, с различными массами бойка

$H$ , мм	$m_6$ , кг	$V_{уд}$ , м/с	$i_{1\text{max}}$	$i_{2\text{max}}$	$W_1$	$W_2$	$W_\Sigma$	$A_{уд}$	$T_{уд}$ , с	$f_{уд}$ , Гц	$\eta$ , %	$\delta_{\text{max}}$ , мм	$P_{\text{мех}}$ , Вт
			А										
$\infty$	4.9	4.9	21.0	28.0	94.5	405.0	499.4	57.9	0.48	2.07	11.6	430	119.6
	7.8	4.6	22.0	27.8	111.7	393.6	511.3	81.0	0.54	2.00	15.8	420	162.4
	11.8	3.5	24.7	29.4	147.9	447.9	595.9	72.3	0.51	1.96	12.1	340	141.7
	13.6	3.2	31.0	33.2	124.0	225.0	350.0	69.0	0.31	3.14	19.7	310	216.6

На модели варианта 2 напряжение, подаваемое на катушки электромагнитов, обеспечивалось не более некоторого критического  $U = U_{\text{кр}}^* = 100 - 110$  В, при котором боек выбегал за пределы катушки холостого хода  $l$  (рис. 1) не далее чем на 250 мм. При этом значении выбега  $H$  внедрение бойка в катушку рабочего хода становилось равным нулю, что является предельно допустимым, и дальнейшее повышение напряжения приводило к выбегу бойка из катушки рабочего хода и снижению КПД. Исследования проводились для различных бойков, масса которых приведена в табл. 1.

На рис. 5 представлены осциллограммы рабочих процессов электромагнитного двигателя по варианту 2 с бойком массой  $m_6 = 14.2$  кг при напряжении на катушках  $U = 65$  В и с бойком массой  $m_6 = 20.0$  кг при напряжении  $U = 80$  В. Осциллограммы рабочих процессов с бойками массой  $m_6 = 11.2$  и  $13.5$  кг не приводятся. Эти бойки имели такую же длину, как и боек  $m_6 = 14.2$  кг, но были облегчены за счет сквозных осевых отверстий соответственно диаметрами 23 и 10 мм. Все исследования проводились при напряжении на катушках  $U \leq U_{\text{кр}}^*$ .

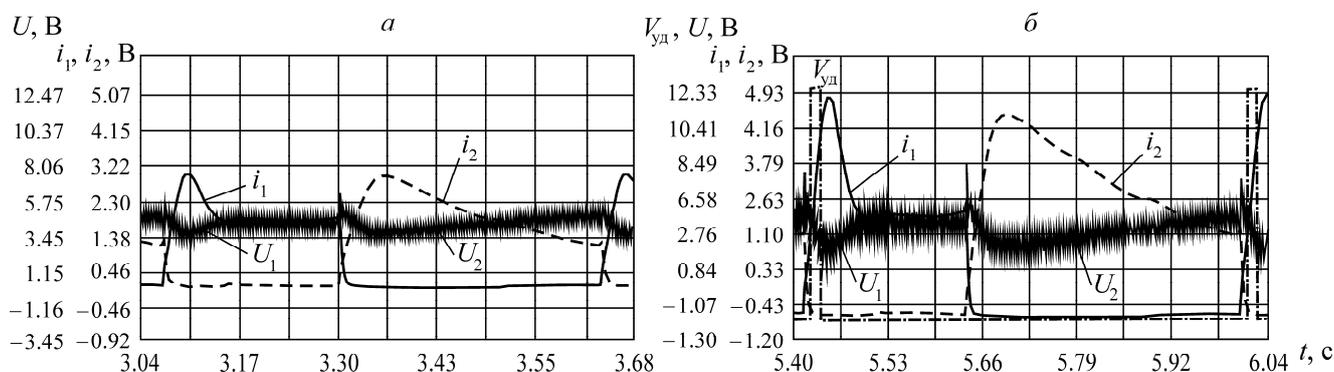


Рис. 5. Осциллограмма рабочего процесса двигателя по варианту 2: а — с бойком массой 14.2 кг,  $U = 65$  В; б — с бойком массой 20.0 кг,  $U = 80$  В

Результаты исследований отражены на рис. 6, где для различных бойков в зависимости от напряжения, подаваемого на катушки, показаны скорость бойка в момент удара  $V_{уд}$  (рис. 6а), энергия удара бойка  $A_{уд}$  (рис. 6б), КПД электромагнитного двигателя  $\eta$  (рис. 6в), частота ударов  $f_{уд}$  (рис. 6г), механическая мощность  $P_{мех} = A_{уд} f_{уд}$  (рис. 6д).

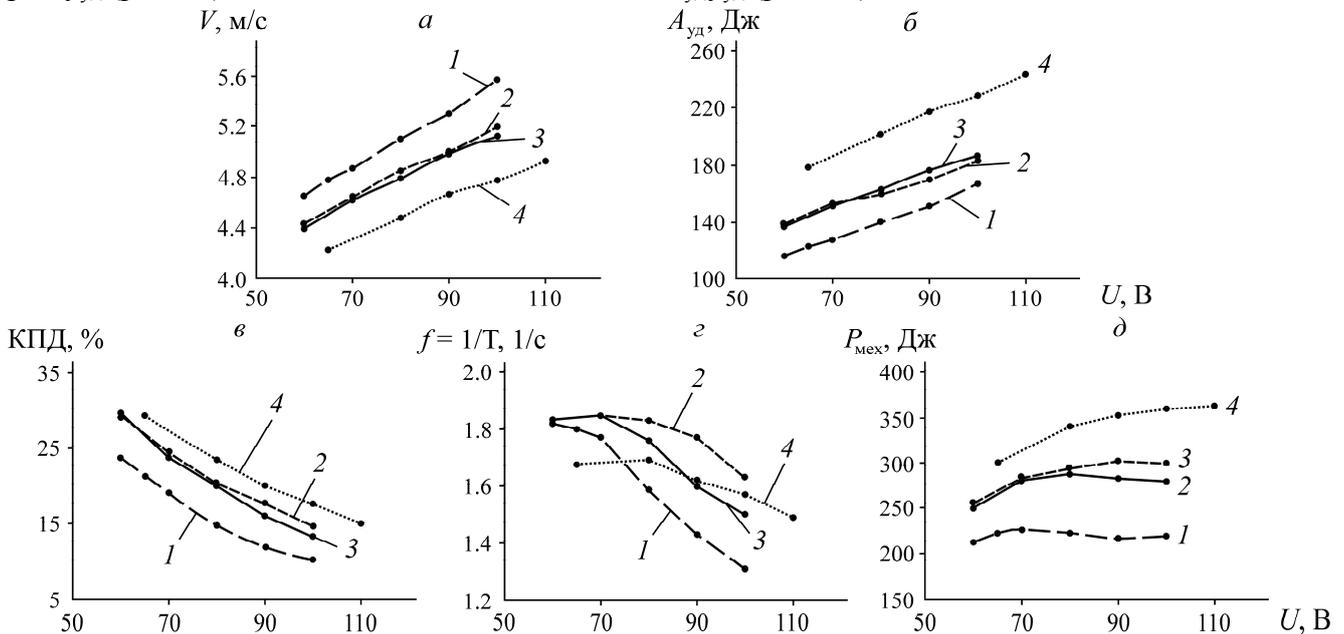


Рис. 6. Зависимости: а — скорости удара  $V_{уд}$  от напряжения на катушках для бойков массой  $m_6 = 11.2$  (1), 13.5 (2), 14.2 (3), 20.0 кг (4); б — энергии удара  $A_{уд}$  от напряжения; в — КПД рабочего цикла двигателя от напряжения; г — частоты ударов от напряжения; д — механической мощности  $P_{мех}$  от напряжения

Из анализа результатов при одинаковом напряжении на катушках электромагнитного двигателя ударного действия следует, что наибольшей скоростью в момент удара обладает самый легкий боек  $m_6 = 11.2$  кг с большим осевым отверстием и соответственно наименьшей — самый тяжелый  $m_6 = 20.0$  кг. Бойки с малым отверстием  $m_6 = 13.5$  кг и сплошной  $m_6 = 14.2$  кг имеют близкие значения скорости в момент удара при одинаковых напряжениях на катушках.

Режимы работ по частоте зависят от напряжения, подаваемого на катушку. Рассмотрим три диапазона напряжений (низкий  $60 \leq U < 70$  В, средний  $70 < U < 90$  В, высокий  $U > 90$  В). При низких напряжениях самой большой частотой обладают легкие бойки. С ростом напряжения начинается рост выбега бойков при холостом ходе, что приводит к снижению частоты ударов двигателя. В результате наибольшие частоты обеспечиваются тяжелыми бойками  $m_6 = 14.2$  и 20.0 кг. Наибольшей энергией удара до 240 Дж характеризуется утяжеленный боек массой  $m_6 = 20.0$  кг. Бойки массой  $m_6 = 14.2$  и 13.5 кг имеют близкие значения энергии удара в диапазоне 140–180 Дж, так как их массы близки.

Наименьшей энергией удара обладает боек с большим осевым отверстием  $m_6 = 11.2$  кг, у которого энергия удара лежит в диапазоне 120–160 Дж, но при этом обеспечивается очень низкий КПД. Наибольший КПД до 30% у двигателя с бойком массой  $m_6 = 20.0$  кг; двигатель с бойком большого отверстия  $m_6 = 11.2$  кг имеет самый низкий КПД 15–25%. Наибольшей механической мощностью отличается ЭДУД с тяжелым бойком  $m_6 = 20.0$  кг, наименьшая механическая мощность у двигателя с бойком массой  $m_6 = 11.2$  кг. Электромагнитный двигатель со

сплошным бойком  $m_6 = 14.2$  кг и бойком с малым осевым отверстием обладает близкой механической мощностью. Частота ударов ЭДУД лежит в диапазоне 1.5–2.2 Гц. Наиболее целесообразной частотой является частота 1.5–1.7 Гц, что отмечается при напряжении на катушках 80 В. При этом боек в собранном молоте (при наличии буфера и коллектора) не наносит ударов по буферу.

### ВЫВОДЫ

Комплекс исследований, проведенный на моделях электромагнитных двигателей ударного действия, предназначенных для работы в качестве ударного привода в скважинных импульсных виброисточниках, позволяет сделать следующие выводы и сформулировать требования к их конструированию.

Для создания электромагнитных ударных узлов с энергией удара 200–300 Дж, выполненных по схеме двухобмоточного молота двойного действия с наружным диаметром не более 115 мм, следует использовать электромагниты с относительной длиной  $L_k / R_1 \geq 20$ , для которых удовлетворяется условие  $F_3 \gg G_6$ .

Для обеспечения высоких значений КПД и механической ударной мощности электромагнитных двигателей необходимо обеспечить рабочий цикл таким образом, чтобы боек при выбеге после холостого хода не выходил за пределы катушки рабочего хода. Это можно выполнить за счет ограничения выбега легкого бойка с помощью отбойника или другого устройства, контролирующего его движение вверх, а также использования тяжелых бойков и правильного подбора напряжения на катушках, при котором выбег бойка ограничивается силой его веса.

При использовании в электромагнитном двигателе ударного действия сплошного бойка или бойка с малым сплошным осевым отверстием его характеристики меняются незначительно. В связи с этим для обеспечения движения воздуха через боек размер осевого отверстия надо выбирать так, чтобы соблюдалось соотношение  $d_{отв} / d_6 \leq 0.25$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф. и др. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010. — 404 с.
2. Oparin V. N., Simonov B. F. Nonlinear deformation-wave processes in the vibrational oil geotechnologies, J. of Mining Science, 2010, Vol. 46, No. 2. — P. 95–112.
3. Симонов Б. Ф., Сердюков С. В., Чередников Е. Н. и др. Результаты опытно-промысловых работ по повышению нефтеотдачи пластов вибросейсмическим методом // Нефт. хоз-во. — 1996. — № 5. — С. 48–52.
4. Симонов Б. Ф., Чередников Е. Н. и др. Технология объемного волнового воздействия на нефтяные залежи для повышения углеводородоотдачи пластов // Нефт. хоз-во. — 1998. — № 4. — С. 42–44.
5. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Савченко А. В. и др. Импульсная гидроударная технология и оборудование для ПНП // Oil & Gas Eurasia. — 2012. — № 6. — С. 40–45.
6. Дыбленко В. П., Марчуков Е. Ю., Туфанов И. А. и др. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами. Кн. 1 // РАЕН. — 2012. — 338 с.
7. Симонов Б. Ф., Кадышев А. И., Нейман В. Ю. Исследование статических параметров длинноходовых электромагнитов для молотов // Транспорт: наука, техника, управление. — 2011. — № 12. — С. 30–32.
8. Симонов Б. Ф., Нейман В. Ю., Шабанов А. С. Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 118–126.
9. Ряшенцев Н. П., Малов А. Г., Носовец А. В. Электромагнитные молоты. — Новосибирск: Наука, 1979. — 268 с.
10. Meeker D. Finite element method magnetics, User's Manual, Ver. 4.0; June 17, 2004.
11. Буль О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособие. — М.: Академия, 2005. — 336 с.

Поступила в редакцию 23/XI 2017