

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ
ОБРАБОТКИ ЖИДКОСТИ ВАТЬЕГАНСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТПП «КОГАЛЫМНЕФТЕГАЗ»**

**Максимочкин В.И., Хасанов Н.А., Шайдаков В.В, Инюшин Н.В.,
Лаптев А.Б., Кузнецов В.С.**

(Башкирский Государственный Университет,
Уфимский Государственный Нефтяной Технический Университет,
ТПП «Когалымнефтегаз»,
Инжиниринговая компания «Инкомп-Нефть»)

Обезвоживание нефти является одним сложным и энергоемким технологическим процессом. В настоящее время для обезвоживания нефти используют отстаивание, центрифугирование, фильтрование, совместное воздействие тепла и химических реагентов, воздействие физических полей, например, электрического, магнитного и электромагнитного поля, импульсных и бесконденсатных разрядов, а также комбинации этих методов. Одним из популярных методов все же остается применение химических реагентов – деэмульгаторов. Но, несмотря на широкий ассортимент химических реагентов, не всегда удается подобрать деэмульгатор, подходящий для определенных эмульсий. В некоторых случаях приходится использовать дорогостоящие импортные реагенты или же применять отечественные деэмульгаторы с большим удельным расходом.

В связи с этим особый интерес вызывает возможность использования метода физико-химического воздействия на водонефтяные эмульсии. Например, совместного воздействия магнитного поля и химических реагентов- деэмульгаторов[1,2].

Для реализации данного метода сотрудниками УГНТУ, ТПП «Когалымнефтегаз», «Инкомп-нефть» и БГУ спроектирована электромагнитная установка УМП для обработки водонефтяных эмульсий Ватьеганского месторождения.

Установка УМП состоит из блока управления и индуктора, врезанного в трубопровод. Индуктор соединяется с блоком управления кабелем. Поток жидкости обрабатывается переменным магнитным полем с импульсным изменением напряженности, направленным поперек потока. Принципиальная электрическая схема установки представлена на рисунке 1.

Индуктор (схема конструкции представлена на рисунке 2) состоит из центрального магнитопровода 1, на который навита обмотка 2, боковых магнитопроводов 3 и магнитопровода 4, примыкающего к внутренней стенке трубы 5.

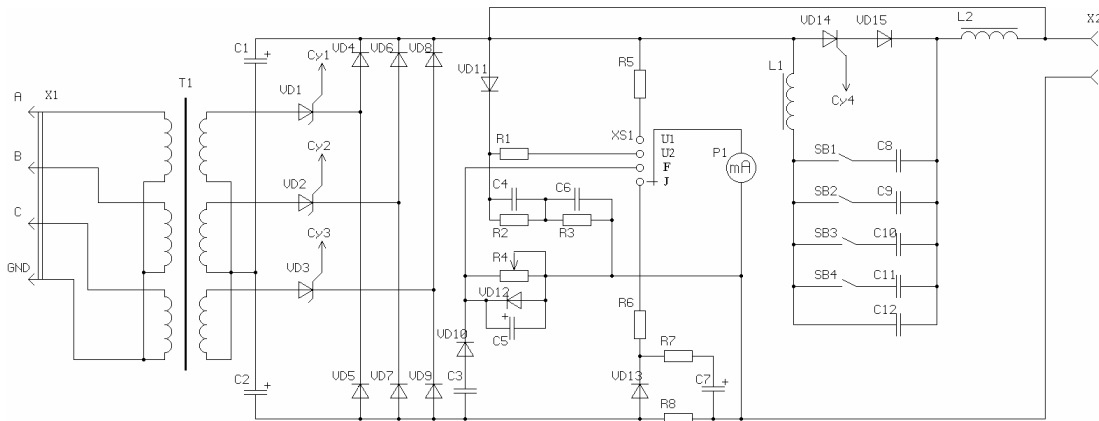


Рис. 1 – Схема электрическая принципиальная электромагнитной установки УМП

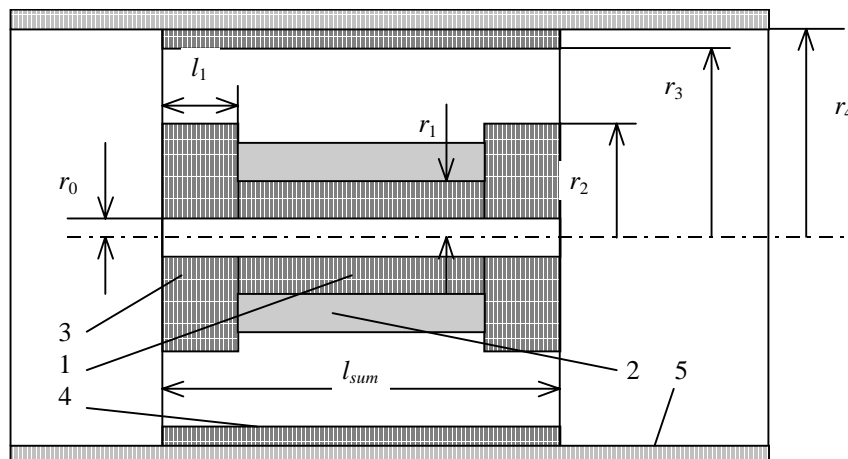


Рисунок 2 – Схема конструкции индуктора магнитной установки УМП:

- 1 – сердечник катушки (внутренняя часть магнитопровода);
- 2 - обмотка; 3 – торцевая часть магнитопровода; 4 – внешняя часть магнитопровода; 5 - труба

Для создания импульсного магнитного поля в данной конструкции индуктора используется следующая схема возбуждения. От специального источника заряжается батарея конденсаторов. Периодически конденсаторы разряжаются через катушку индуктора. При этом в катушке индуктора возникают затухающие колебания тока и, следовательно, магнитного поля:

$$I = I_m e^{-\beta t} \sin \omega t \quad (1)$$

Амплитуда тока (I_m), частота затухающих колебаний (ω), а также коэффициент затухания (β) зависят от характеристик индуктора.

Для получения заданных параметров затухающих колебаний были проведены специальные расчеты.

В частности, чтобы найти максимальное значение индукции магнитного поля, требуется знать максимальный ток. В первом приближении можно считать, что максимальное значение тока достигается через четверть периода после начала зарядки батареи конденсаторов:

$$I_{\max} = \omega_0 q_0 \exp(-\beta T / 4), \quad (2)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ - собственная циклическая частота контура, q_0 - начальный заряд конденсаторов, T - период затухающих колебаний, связанный с циклической частотой ω соотношением:

$$T = 2\pi / \omega. \quad (3)$$

Коэффициент затухания колебаний (β) можно найти, зная сопротивление и индуктивность:

$$\beta = \frac{R + R_1}{2L}, \quad (4)$$

где R - активное сопротивление провода, R_1 - дополнительное сопротивление, вызванное потерями. $R_1 \approx 10$ Ом было определено экспериментально.

Циклическая частота затухающих колебаний определяется соотношением:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (5)$$

Начальный заряд q_0 на батарее конденсаторов вычисляется по ее суммарной емкости C и напряжению U_0 . Если конденсатор с емкостью C подключить к источнику питания с напряжением U_0 , то на конденсатор перетечет заряд:

$$q_0 = CU_0. \quad (6)$$

Индукция магнитного поля в зазоре электромагнита связана с магнитным потоком сцепления и с током, протекающим по обмотке:

$$\Psi = L \cdot I = B \cdot N \cdot S_{\text{зазора}}. \quad (7)$$

Тогда для максимального значения магнитной индукции в обозначениях представленных на рисунке 2 можно написать соотношение:

$$B_{\max} = \frac{LI_{\max}}{NS_{air}}. \quad (8)$$

Здесь S_{air} - площадь поперечного сечения воздушного промежутка, вычисленная по формуле:

$$S_{air} = X \cdot 2\pi \frac{r_2 + r_3}{2} l_1, \quad (9)$$

где X - множитель, учитывающий расширение магнитного потока в воздушном промежутке, r_2 , r_3 и l_1 - размеры, указанные на рисунке 2.

Активное сопротивление R провода оценивалось по формуле:

$$R = \rho \frac{l_{провода}}{S_{сеч.провода}} = 4N\rho \frac{r_1 + r_2}{D^2}, \quad (10)$$

где N - число витков в катушке, ρ - удельное электрическое сопротивление меди, r_1 и r_2 - внутренний и внешний радиусы катушки, D - диаметр провода.

Для расчета индуктивности катушки электромагнита использовался следующий метод. Известно, что циркуляция напряженности по любому замкнутому контуру равна суммарному току, пронизывающему площадь, ограниченную этим контуром:

$$\oint Hdl = NI, \quad (11)$$

где H - напряженность магнитного поля, N - число витков в катушке, I - ток в проводе.

Для расчета интеграла (11) замкнутый магнитный контур мысленно разделим на несколько частей (с длиной l_i), в каждой из которых напряженность H_i магнитного поля примем постоянной:

$$\sum_i H_i l_i = NI. \quad (12)$$

Напряженность магнитного поля в (12) можно выразить через индукцию:

$$B_i = \mu_0 \mu_i H_i. \quad (13)$$

Учитывая, что поток Φ через любое сечение S_i магнитопровода один и тот же и равен $B_i S_i$, получим:

$$H_i = \frac{\Phi}{\mu_0 \mu_i S_i}. \quad (14)$$

Подставляя это выражение в (12), находим:

$$\Phi \sum_i \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i S_i} = NI, \quad (14)$$

откуда

$$\Phi = \frac{NI}{\sum_i \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i S_i}}. \quad (15)$$

Учитывая, что индуктивностью L электрического контура, согласно (7), называется коэффициент пропорциональности между током и потокоцеплением Ψ (суммарным потоком через все N витков):

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N\Phi}{I}. \quad (16)$$

Подставляя сюда выражение (15) для потока Φ через один виток (т.е. через сечение), получим:

$$L = \frac{N^2}{\sum_i \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i S_i}}. \quad (17)$$

При известных геометрических размерах и проницаемостях частей можно вычислить индуктивность:

$$L = \frac{N^2 \mu_0 \pi}{\left(\frac{l_{sum} - l_1}{\mu(r_1^2 - r_0^2)} + \frac{2(r_2 - r_1)}{\mu(r_1 + r_2)l_1} + \frac{2(r_3 - r_2)}{X(r_2 + r_3)l_1} + \frac{l_{sum} - l_1}{\mu(r_4^2 - r_3^2)} \right)}, \quad (18)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, μ - относительная магнитная проницаемость стали магнитопровода, r_0 - радиус продольного отверстия в сердечнике (см. рисунок 2), r_1 - радиус сердечника в узкой части, r_2 - радиус сердечника на утолщенных концах, r_3 - внутренний диаметр трубы, r_4 - внешний диаметр трубы, l_{sum} - суммарная длина сердечника, l_1 - длина любого из утолщенных концов сердечника, X - множитель, учитывающий расширение магнитного потока в воздушном промежутке.

Для расчетов магнитной индукции в зазоре, индуктивности катушки возбуждения, частоты затухающих колебаний и т.д. использовались следующие начальные данные:

$l_{sum}=0,520$ м, $l_1=0,020$ м, $r_0=0,025$ м, $r_1=0,075$ м, $r_2=0,180$ м, $r_3=0,230$ м, $r_4=0,250$ м.

$\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ м, $X=1,5$, $R_1=10$ Ом.

Удельное сопротивление меди $\rho=1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Результаты расчетов представлены в таблицах 1- 4 и на рисунках 3-5.

Таблица 1 - Зависимость параметров индуктора от диаметра намоточного провода

$D_{\text{провода}}, \text{ м}$	$L, \text{ Гн}$	$f, \text{ Гц}$	$I_{\text{max}}, \text{ А}$	$B_{\text{max}}, \text{ Тл}$
0,0005	0,0213	146,0	8,1	0,0212
0,0010	0,0213	164,8	13,3	0,0350
0,0015	0,0213	166,9	14,4	0,0378
0,0020	0,0213	167,6	14,8	0,0388
0,0025	0,0213	167,9	15,0	0,0393
0,0030	0,0213	168,0	15,1	0,0395

Таблица 2 - Зависимости параметров $L, f, I_{\text{max}}, B_{\text{max}}$ от проницаемости магнитопровода

μ	$L, \text{ Гн}$	$f, \text{ Гц}$	$I_{\text{max}}, \text{ А}$	$B_{\text{max}}, \text{ Тл}$
1	2	3	4	5
500	0,0204	170,8	15,0	0,0377
1000	0,0209	169,0	14,9	0,0383
1500	0,0211	168,4	14,8	0,0385
2000	0,0212	168,0	14,8	0,0386
2500	0,0212	167,9	14,8	0,0387
3000	0,0212	167,7	14,8	0,0387
3500	0,0213	167,6	14,8	0,0388
4000	0,0213	167,6	14,8	0,0388
4500	0,0213	167,5	14,8	0,0388
5000	0,0213	167,5	14,8	0,0388

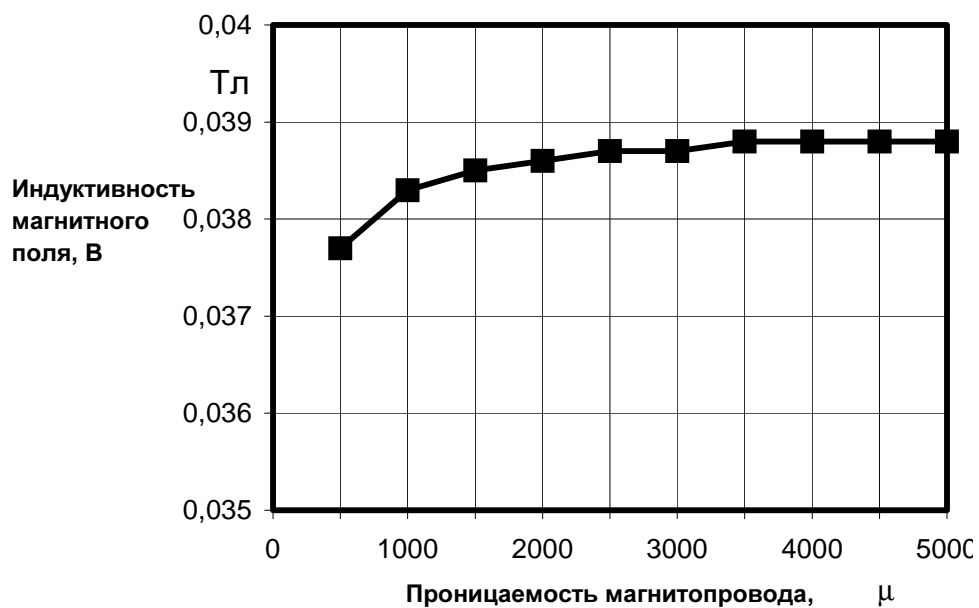


Рисунок 3 – Зависимость индукции магнитного поля в зазоре от проницаемости магнитопровода

Магнитная проницаемость μ для разных типов сталей в умеренных полях меняется от 2000 (обычная литая сталь) до 30000 (некоторые сорта кремнистой трансформаторной стали). Однако, как показали расчеты (рисунок 4, таблица 1), при $\mu > 2000$ результаты практически не зависят от проницаемости. При дальнейших расчетах использовалось значение $\mu = 4000$ (сталь 1312).

В таблице 3 представлены зависимости параметров индуктора от числа витков обмотки. Как видно, максимальное значение индукции слабо зависит от числа витков (рисунок 4). Однако изменение числа витков в обмотке возбуждения достаточно сильно влияет на частоту затухающих колебаний.

Таблица 3 - Зависимость параметров индуктора от числа витков обмотки

N	L, Гн	f, Гц	I _{max} , А	B _{max} , Тл
200	0,0193	175,5	15,2	0,0381
210	0,0213	167,6	14,8	0,0388
220	0,0234	160,4	14,4	0,0395
230	0,0255	153,7	13,9	0,0401
240	0,0278	147,6	13,5	0,0406
250	0,0302	141,9	13,2	0,0411
260	0,0326	136,6	12,8	0,0416
270	0,0352	131,7	12,5	0,0421
280	0,0378	127,2	12,1	0,0425
290	0,0406	122,9	11,8	0,0429
300	0,0434	118,9	11,5	0,0433
310	0,0464	115,2	11,3	0,0436
320	0,0494	111,7	11,0	0,0439
330	0,0526	108,4	10,7	0,0442
340	0,0558	105,3	10,5	0,0445
350	0,0591	102,3	10,3	0,0448

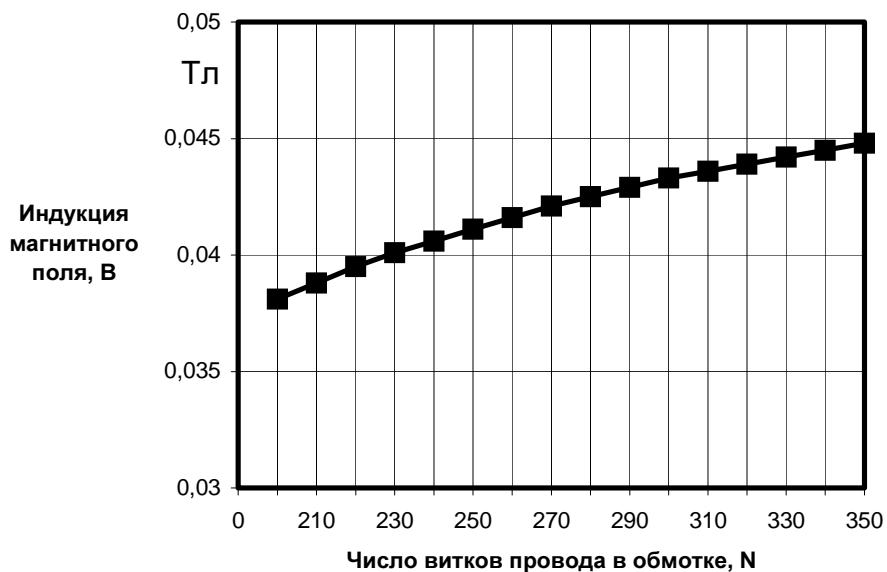


Рисунок 4 - Зависимость магнитной индукции в зазоре электромагнита от числа витков провода в его обмотке

Параметры поля, получаемого с помощью импульсного электромагнита, зависят от источника тока. При диаметрах намоточного провода более 1 мм наблюдается очень слабая зависимость индукции B_{\max} от диаметра намоточного провода обмотки возбуждения (таблица 4).

Таблица 4 - Зависимость параметров индуктора от напряжения зарядки конденсатора

$U_0, \text{В}$	$L, \text{Гн}$	$f, \text{Гц}$	$I_{\max}, \text{А}$	$B_{\max}, \text{Тл}$
100	0,0213	167,6	3,0	0,0078
200	0,0213	167,6	5,9	0,0155
300	0,0213	167,6	8,9	0,0233
400	0,0213	167,6	11,8	0,0310
500	0,0213	167,6	14,8	0,0388
600	0,0213	167,6	17,7	0,0466
700	0,0213	167,6	20,7	0,0543
800	0,0213	167,6	23,7	0,0621
900	0,0213	167,6	26,6	0,0698
1000	0,0213	167,6	29,6	0,0776

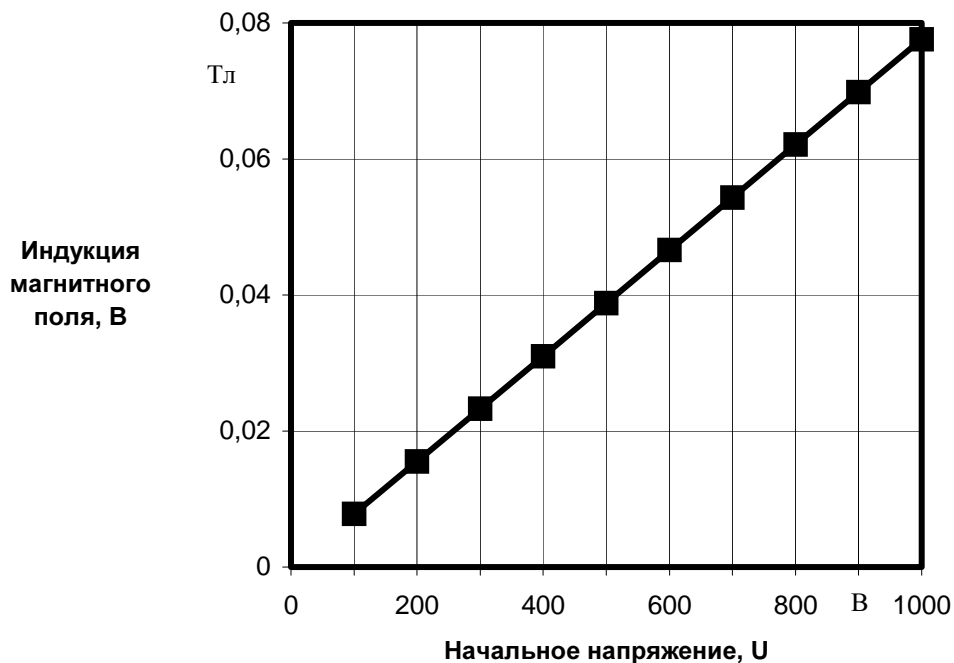


Рисунок 5 - Зависимость магнитной индукции от начального напряжения на батарее конденсаторов

Как видно из таблицы 4 и рисунка 5, максимальное значение индукции магнитного поля в зазоре очень сильно зависит от напряжения на конденсаторе. Более слабая зависимость магнитного поля с насыщением наблюдалась от емкости конденсатора (таблица 5 и рисунок 6).

Таблица 5 - Зависимость параметров индуктора от емкости конденсатора

C, мкФ	L, Гн	f, Гц	I _{max} , А	B _{max} , Тл
10	0,0213	342,5	9,0	0,0236
20	0,0213	240,5	11,7	0,0308
30	0,0213	194,9	13,5	0,0354
40	0,0213	167,6	14,8	0,0388
50	0,0213	148,8	15,8	0,0413
60	0,0213	134,8	16,5	0,0433
70	0,0213	123,8	17,1	0,0448
80	0,0213	114,9	17,6	0,0461
90	0,0213	107,5	17,9	0,0470
100	0,0213	101,2	18,2	0,0477
110	0,0213	95,7	18,4	0,0483
120	0,0213	90,8	18,5	0,0486
130	0,0213	86,5	18,6	0,0489
140	0,0213	82,7	18,7	0,0490
150	0,0213	79,2	18,7	0,0490

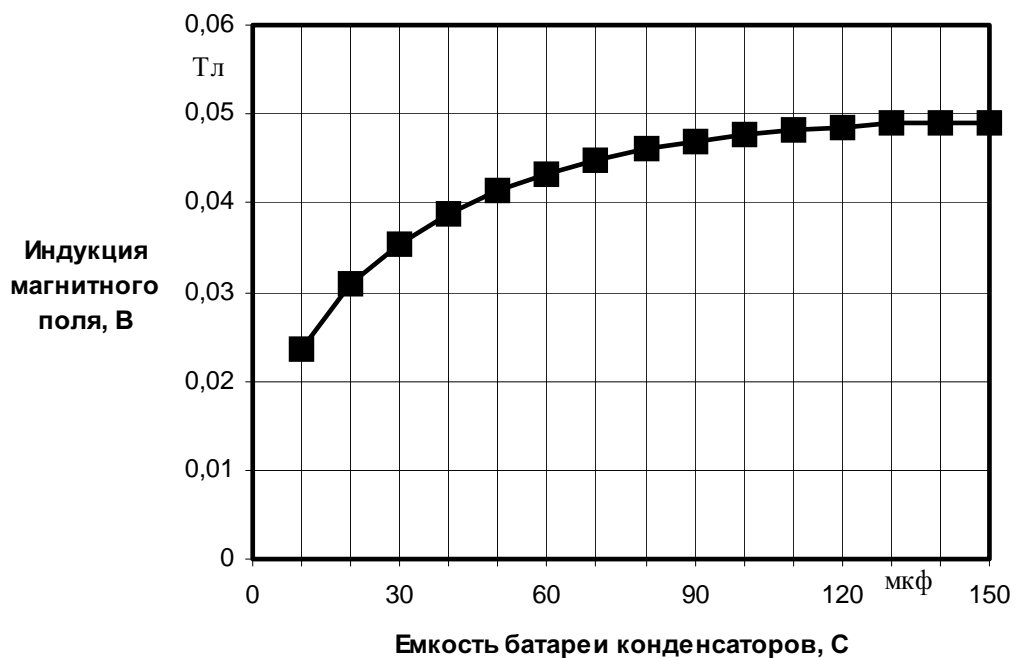


Рисунок 6 - Зависимость магнитной индукции в зазоре от емкости батареи конденсаторов источника

Из анализа результатов моделирования для практического использования были выбраны следующие параметры:

Число витков $N \approx 200$.

Диаметр провода $D=(1,5-2,0) \cdot 10^{-3}$ м.

Начальное напряжение $U_0=800$ В.

Емкость батареи конденсаторов $C=(40 - 100) \cdot \text{мкФ}$

При этих параметрах индуктор должен иметь следующие характеристики:

Индуктивность $L=0,2$ Гн.

Частота затухающих колебаний $f=(100-173)$ Гц, в зависимости от емкости

Максимальный ток $I_{\text{max}}=18-24$ А.

Максимальное значение магнитной индукции $B_{\text{max}}=(0,047-0,062)$ Тл.

После изготовления индуктора были проведены измерения его параметров.

Для измерения импульсного магнитного поля в зазоре индуктора была изготовлена измерительная катушка.

Как известно, ЭДС наводимая в витках катушки, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего эту катушку и, следовательно, скорости изменения индукции магнитного поля:

$$E = -n \frac{d\Phi}{dt} = -nS \frac{dB}{dt}.$$

Если эту ЭДС пропустить через интегратор, то напряжение на выходе интегратора будет пропорционально магнитной индукции:

$$U(t) = K \cdot B(t),$$

откуда индукцию можно рассчитать, измеряя с помощью осциллографа напряжение U :

$$B_{\text{max}} = U_{\text{max}} / K = C \cdot U_{\text{max}},$$

где $1/K=C=4,9$ Т/В - постоянная измерительной катушки.

Значение напряжения в любой момент времени можно измерить с помощью осциллографа. Таким образом, для измерения максимального значения индукции магнитного поля в зазоре индуктора ЭДС с измерительной катушки через интегратор подавали на осциллограф, на котором тоже наблюдались затухающие колебания напряжения пропорционального индукции.

Максимальное значение индукции рассчитывали по формуле:

$$B_{\text{max}} = U_{\text{max}} / K = C \cdot U_{\text{max}},$$

где $1/K=C=4,9$ Т/В - постоянная измерительной катушки.

Измерения проводили при двух значениях числа витков в обмотке индуктора и при нескольких значениях времени τ между импульсами разрядки конденсатора.

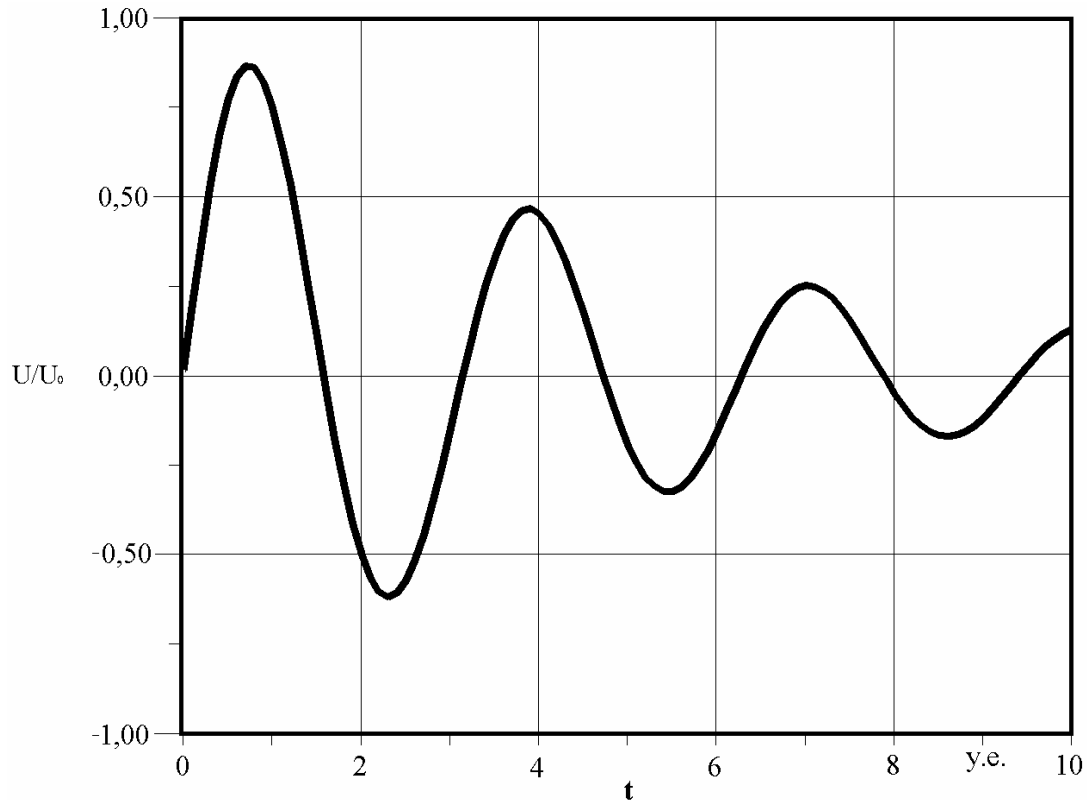


Рисунок 7 - Зависимость напряжения от времени на выходе интегратора

Результаты измерений представлены в таблице 6 (τ - время между последовательными импульсами, ϵ - показания измерительного прибора).

Таблица 6 – Параметры индуктора после измерения

N	C, мкФ	U_0 , В	I_{\max} , А	τ , мс	f, Гц	ϵ , мВ	B_{\max} , Тл
300	100	1000	20	55	100	12	0,058
200	80	1000	22	55	125	11	0,054
200	100	800	23	40	125	9	0,045
200	100	800	23	25	125	8	0,040

Как видно из таблицы 6, значения параметров индуктора получились несколько ниже, но довольно близки к расчетным. Из таблицы также видно, что с увеличением частоты следования импульсов значение индукции магнитного поля уменьшается.

Для проведения промышленных испытаний, изготовленные инжиниринговой компанией «Инкомп-нефть» две установки для обработки жидкости импульсным магнитным полем смонтированы на Ватьеганском месторождении в цехе подготовки нефти между первой и второй ступенями на байпасных линиях. Установка УМП-325 включает пульт управления (рис. 8) и индуктор (рис. 9).

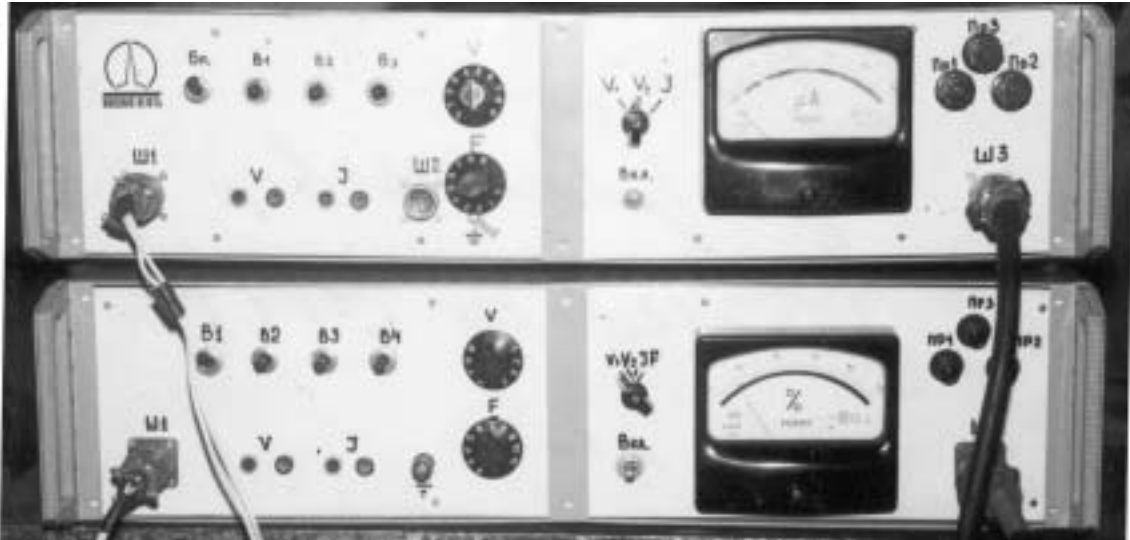


Рис. 8 Пульт управления установки УМП-325



Рис. 9 Индуктор установки УМП-325

Заключение

Т.о. представлен расчет параметров индуктора электромагнитной установки УМП для физико-химического воздействия на водонефтяные эмульсии Ватьеганского месторождения ТПП «Когалымнефтегаз». Показано, что максимальное значение индукции импульсного магнитного поля в зазоре зависит от напряжения на конденсаторе.