

Применение численных методов для модернизации электромагнитного привода плунжерного насоса системы одоризации газа

В.В. Боголюбов
(Саров, Нижегородская область, Россия)
Bogolubovv@gmail.com

кандидат технических наук,
ведущий инженер
ООО «НПО ВНИИЭФ-ВОЛГОГАЗ»

Д.В. Росчихмаров

старший научный сотрудник
ООО «НПО ВНИИЭФ-ВОЛГОГАЗ»

В статье показана возможность успешного применения численных методов к решению задачи улучшения рабочих характеристик плунжерного насоса при наложении ограничений на изменение конструкции изделия и частичном отсутствии знаний о характеристиках материалов деталей конструкции. Эффективность технических предложений, разработанных на основании результатов моделирования подтверждены экспериментально.

Материалы и методы
Численные методы

Ключевые слова
численные методы, электромагнитный привод, плунжерный насос, модернизация

Numerical methods for modernization of a plunger pump's solenoid drive of gas odorization system

Authors
Valeriy V. Bogolyubov
(Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia)

PhD, leading engineer
«SPE VNIIEF-VOLGOGAZ Ltd.»

Dmitry V. Roschikhmarov
senior researcher
«SPE VNIIEF-VOLGOGAZ Ltd.»

Abstract
The article describes the possibility for successful implementation of numerical

При модернизации устройств, как правило, требуется изменить характеристики изделия для обеспечения новых требований, а глобальные конструктивные изменения, переводятся в разряд ограничений. Экспериментальный поиск путей оптимизации характеристик устройства достаточно дорог и не всегда приводит к положительным результатам. В этом случае применение численных методов практически незаменимо и может быть продемонстрировано на примере модернизации плунжерного насоса системы одоризации газа.

Системы одоризации газа предназначены для автоматического дозированного введения в поток природного или сжиженного газа сильно пахнущего вещества (одоранта). Это необходимо для обнаружения утечек газа из газового оборудования, так как природный газ сам по себе практически не имеет запаха. «Сердцем» системы является насос, обеспечивающий поступление одоранта в сеть.

Задача модернизации плунжерного насоса была поставлена следующим образом: необходимо обеспечить выполнение технических требований по перемещению плунжера, начальному усилию, развиваемым приводом и напряжению питания (таблица 1)

при минимальных изменениях конструкции электромагнитного привода (катушка, якорь, магнитопровод) плунжерного насоса.

За исходный вариант конструкции принимается действующий вариант плунжерного насоса в соответствие со сборочными чертежами. Внешний вид насоса показан на рисунке 1. Накладываются следующие ограничения:

- геометрические размеры конструкции не должны быть изменены в радиальном направлении, допускаются небольшие изменения размеров в осевом направлении;
- внешний диаметр катушки не должен быть больше существующего и по-возможности должен быть минимизирован;
- материалы составных частей конструкции могут быть заменены с учётом прочностных характеристик и коррозионной стойкости;
- рабочее напряжение катушки привода – не изменять.

В таблице 2 представлены экспериментальные данные по значениям усилий на плунжере и его перемещений действующего насоса при различных напряжениях питания катушки электромагнитного привода.

Таким образом, задача модернизации сводилась к поиску вариантов электромагнитного привода, способного увеличить пе-



Рис. 1 — Внешний вид плунжерного насоса

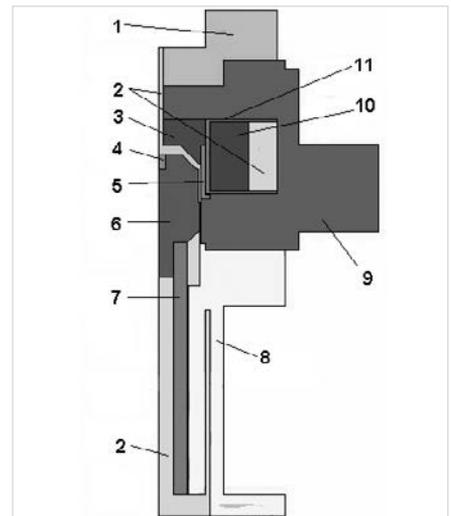


Рис. 2 — Модель плунжерного насоса.
1 – верхняя часть, 2 – воздух, 3 – ампула,
4 – вставка в якорь, 5 – вставка в ампулу,
6 – якорь, 7 – шток, 8 – цилиндр с корпусом,
9 – корпус, 10 – обмотка,
11 – корпус катушки

№	Параметр	Требование
1	Начальное усилие, развиваемое приводом, кг	50
2	Перемещения плунжера от начального положения, мм	1,2 2,4 3 4
3	Напряжение питания катушки привода, В	24

Таб. 1 — Требования к характеристикам насоса

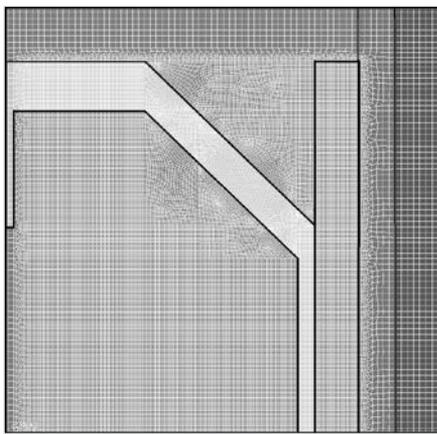


Рис. 3 — Конечно-элементная сетка в области якоря

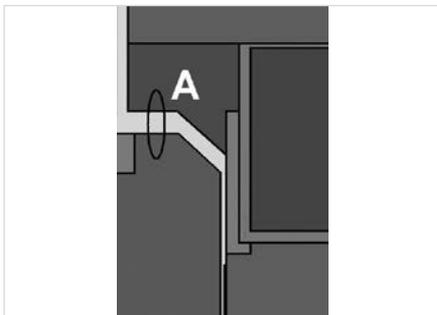


Рис. 4 — Начальное значение положение якоря

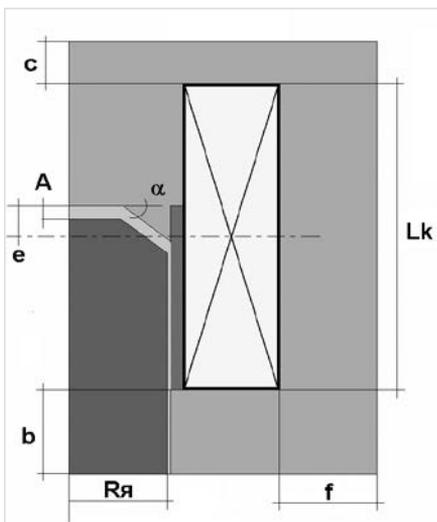


Рис. 5 — Упрощенная модель электромагнитной системы насоса. Параметры: c — толщина магнитопровода над катушкой, α — угол конической части якоря, e — отклонение величины углубления якоря в катушку от центрального уровня, b — ширина боковой поверхности контакта якоря и магнитопровода, $R_{я}$ — радиус якоря, f — толщина боковой части магнитопровода, L_k — высота катушки

ремещение плунжера насоса более чем на 20%, при одновременном увеличении усилия, развиваемого приводом более чем в 5 раз без значительных изменений конструкции.

Известно, что при использовании численных методов большое значение имеют знания о характеристиках материалов изделий. В рассматриваемом случае знания о магнитных свойствах материалов компонентов насоса можно было охарактеризовать следующим образом:

- отсутствие по некоторым компонентам;
- широкий диапазон изменения значений;
- противоречивость.

Исходя из того, что в наличии были некоторые экспериментальные данные о характеристиках насоса, данные о материалах конструктивных элементов [1], и почти полное отсутствие точных данных о магнитных свойствах используемых материалов, модернизация электромагнитного привода выполнялась в пять этапов:

1. Построение конечно-элементной модели плунжерного насоса.
2. Верификационные расчёты, определение характеристик модельных материалов.
3. Исследование влияния геометрических параметров электромагнитной системы на уровень силы, действующей на плунжер.
4. Определение множества допустимых вариантов электромагнитной системы.
5. Выбор рационального варианта электромагнитной системы.

В соответствии с тем, что конструкция плунжерного насоса имеет центральную ось симметрии, конечно-элементная модель разработана в плоской осесимметричной постановке. На рисунке 2 приведена геометрия модели.

В модели допущены некоторые упрощения. Это коснулось верхней и нижней части корпуса. Допущенные упрощения не вносят значимых изменений в результаты вычислений. Плунжер (якорь и шток), катушка, элементы ампулы и зазоры смоделированы в соответствии с чертежами. Конечно-элементная сетка в области якоря и ампулы показана на рисунке 3.

На втором этапе произведены верификационные расчёты, целью которых являлась проверка работоспособности разработанной модели и определение характеристик модельных материалов на основе сравнения результатов расчётов и экспериментальных данных. В качестве входных величин при расчётах задавались положение якоря относительно торца ампулы (расстояние A на рисунке 4) и напряжение на обмотке катушки, определялось значение вертикальной составляющей магнитной силы на якорь F .

В таблице 3 приведены расчётные и экспериментальные данные. Заметно, что погрешность вычислений увеличивается

methods for solving a problem on optimization of working properties of a plunger pump.

The article also presents the construction limitations and lack of the knowledge of material properties of the aggregate parts. The efficiency of the engineering solutions has been developed based on modeling results and proved by experiments.

Materials and methods

Numerical Methods.

Results

The design of electromagnetic system of the plunzherny pump is modernized.

Conclusions

The implementation of numerical methods makes it possible to solve the problem of the plunger pump modernization without numerous experiments and expensive construction of real model.

Moreover, the numerical methods used allow us to fulfill the following tasks, namely:

- 1) to obtain the correct results promptly
- 2) to define the needed changes of magnetic cord's size
- 3) to define the size of contact zones of the anchor and magnetic cord

It has been shown that numerical methods can be successfully implemented for inconsistent material properties or in case when some of them are not available. The obtained results indicate good conformity of the calculations with experimental results.

Keywords

numerical methods, electromagnetic actuator, plunger pump, modernization

References

1. B. K. Bul. The foundations for the theory and calculations of magnetic circuits. M, 1964
2. A. V. Gordon, A. G. Slivinskaya. DC electromagnets. M, 1960

Ход плунжера, мм	Усилие, кг	Напряжение на катушке, В	Напряжение на обмотке U, В (ток I, А)	Зазор между якорем и ампулой, мм	Усилие на якорь, кг		Отклонение, %
					Эксперимент	Расчёт	
2,07	17,5	24	24 (1,32)	2,07	17,5	17,8	1,7
2,07	25	30	30 (1,65)		25	26,7	6,8
3,05	9,8	24	24 (1,32)	3,05	9,8	9,6	-2
3,05	14	30	30 (1,65)		14	15,3	9,2

Таб. 2 — Экспериментальные характеристики насоса

Ход плунжера, мм	Усилие, кг	Напряжение на катушке, В	Напряжение на обмотке U, В (ток I, А)	Зазор между якорем и ампулой, мм	Усилие на якорь, кг		Отклонение, %
					Эксперимент	Расчёт	
2,07	17,5	24	24 (1,32)	2,07	17,5	17,8	1,7
2,07	25	30	30 (1,65)		25	26,7	6,8
3,05	9,8	24	24 (1,32)	3,05	9,8	9,6	-2
3,05	14	30	30 (1,65)		14	15,3	9,2

Таб. 3 — Сравнение экспериментальных и расчётных данных

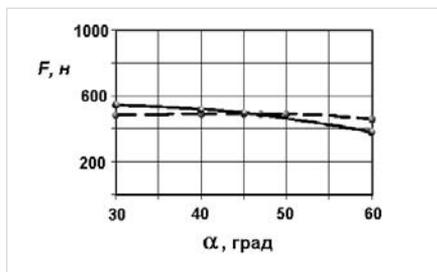


Рис. 6 — Зависимость F от параметра α

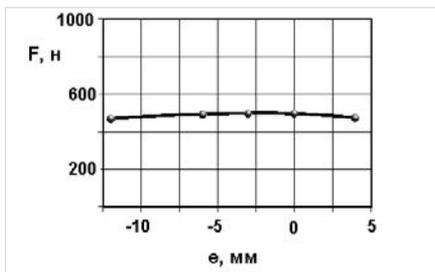


Рис. 10 — Зависимость F от параметра e

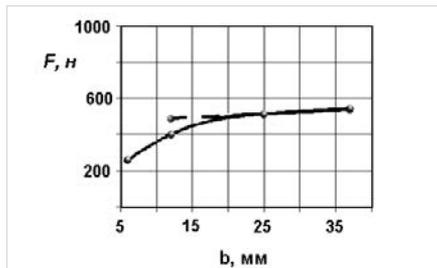


Рис. 7 — Зависимость F от параметра b

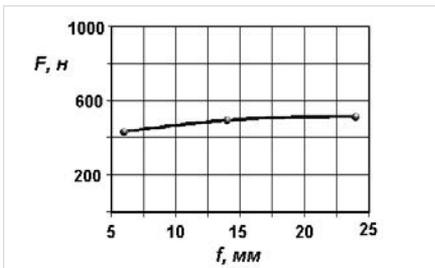


Рис. 11 — Зависимость F от параметра f

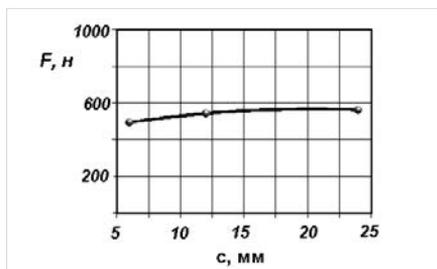


Рис. 8 — Зависимость F от параметра c

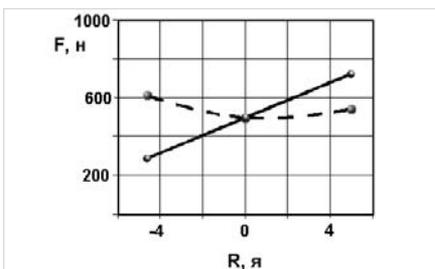


Рис. 12 — Зависимость F от параметра Rя

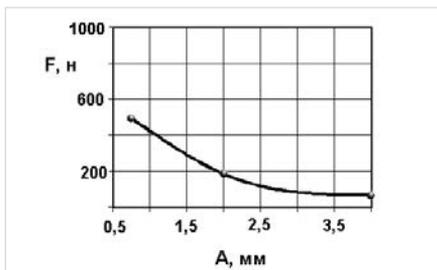


Рис. 9 — Зависимость F от параметра A

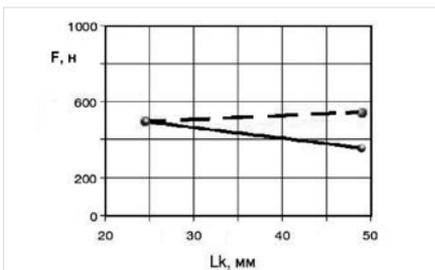


Рис. 13 — Зависимость F от параметра Lk

N	J, A/м2	F, Н	dпр, мм	Nв	R, Ом	I, A	U, В
1	12.2e+6	516,4	0,5	1250	18,2	3,4	61
2	7e+6	516,3	0,5	2109	33,9	2,16	73,2
2.1	7e+6	516,3	0,6	1465	16,35	3,26	53,3
3	4,8e+6	510,9	0,5	3160	50,78	1,44	73,3
3.1	4,8e+6	510,9	0,6	2194	24,5	2,14	52,3
4	3,9e+6	512,8	0,5	3728	60	1,16	69,7
4.1	3,9e+6	512,8	0,6	2589	29	1,7	49,7

Таб. 4 — Значения параметров вариантов электромагнитной системы плунжерного насоса

N	Dmin, мм	a, мм	h, мм	F, Н	J, A/м2	dпр, мм	Nв	R, Ом	I, A	U, В
1	35	24	44	531	3,97e+6	0,6	2614	29,91	1,6	48
2	40	24	44	569	4,11e+6	0,9	1161	6,41	3,74	24
3	40	24	44	451	3,66e+6	0,6	2614	32,45	1,47	48
4	45	26	44	800	4,14e+6	0,7	2080	21,05	2,28	48
5	40	27	44	749	4,23e+6	0,7	2160	20,62	2,32	48
6	35	12	44	165	4,98e+6	0,6	1307	11,91	2,01	24

Таб. 5 — Результаты уточняющих расчётов

при увеличении зазора A и тока в обмотке. Так, при изменении силы тока в обмотке на зазоре 2,07 мм изменение погрешности вычислений составило 5,1%, а при зазоре 3,05 мм изменение погрешности достигло 11,2%. Учитывая, что максимальное значение зазора (хода плунжера) должно составлять 4 мм, в дальнейшем при получении расчётных оценок рекомендовано иметь ~15% запас по развиваемому усилию.

Для исследования влияния геометрических параметров конструкции электромагнитной системы насоса на величину магнитной силы F, действующей на якорь была разработана упрощенная конечно-элементная модель. Вид модели и пояснения представлены на рисунке 5.

В общем виде исследовалась зависимость:

$$F = F(\alpha, b, c, A, e, f, R_{я}, L_k) \quad (1)$$

Расчёты проведены для двух значений зазора A: 0,75 мм и 2 мм. На рисунках 6–13 представлены расчётные зависимости магнитной силы F от геометрических параметров электромагнитной системы насоса. Сплошная кривая — для значения зазора A=0,75 мм, пунктирная кривая — для значения зазора A=2 мм.

Анализ полученных зависимостей позволил определить параметры конструкции, существенно влияющие на изменение силы F.

С учётом проведённых расчётных исследований, теоретических положений [2] и наложенных ограничений были даны рекомендации по изменениям геометрии магнитопровода плунжерного насоса, а именно:

- рекомендуемый размер боковой зоны контакта якоря и магнитопровода (параметр b на рисунке 5) — не менее 10 мм;
- рекомендуемые размеры боковой и верхней зоны магнитопровода (параметры c и f на рисунке 5) — не менее 6 мм.

Далее на основании полученных расчётных данных и сборочного чертежа плунжерного насоса были предложены к рассмотрению несколько вариантов электромагнитной системы. Согласно сборочному чертежу каркас катушки заполнен обмоткой немногим более половины проводом диаметром 0,5 мм. Представлялось логичным выделить четырёх основных вариантов:

- 1 вариант — стандартная катушка плунжерного насоса, заполненная витками немногим более половины по радиусу (действующий вариант плунжерного насоса);
- 2 вариант — стандартная катушка полностью заполненная обмоткой;
- 3 вариант — катушка, полностью заполненная обмоткой и увеличенная в высоту в 1,5 раза;
- 4 вариант — катушка, полностью заполненная обмоткой и увеличенная в высоту в 2 раза.

Сечения обмоток для исследуемых вариантов приведены на рисунке 14.

Было добавлено ещё три подварианта катушек 2, 3 и 4 отличающиеся диаметром провода (0,6 мм).

Задавался диаметр провода катушки — d_{пр}

в миллиметрах. Рассчитывались параметры:
 J , A/m^2 — плотность тока, создаваемого обмоткой;
 F, H — вертикальная составляющая силы, развиваемой на якоре;
 N_b — количество витков обмотки (рассчитывалось приблизительно с учётом изоляции и фактора заполнения $\lambda = 0,7$);
 R, Om — сопротивление обмотки;
 I, A — сила тока в обмотке;
 U, B — напряжение на обмотке.

Оценочные значения параметров вариантов электромагнитной системы плунжерного насоса приведены в таблице 4.

Анализ полученных расчётных данных позволил сделать заключение, что для достижения начального усилия на якоре в 50 кг для хода плунжера 4 мм целесообразно рекомендовать изменение параметров катушки электромагнитной системы (без изменения размеров деталей плунжера) по вариантам 3; 4; 4.1.

Кроме того, исследования показали, что невозможно добиться желаемого результата по усилию отрыва на якоре, не изменяя параметров электрического тока, подаваемого на катушку индуктивности. После обсуждения результатов моделирования были проведены уточняющие расчёты параметров катушки (рисунок 15). Результаты расчётов приведены в таблице 5.

В результате рассмотрения результатов моделирования было принято решение модернизацию электромагнитной системы плунжерного насоса проводить по двум направлениям:

- 1 увеличить размер боковой зоны контакта якоря и магнитопровода (параметр b на рисунке 16) до 15,8 мм;
- 2 использовать две катушки в электромагнитной системе насоса с отдельными контурами питания.

Чертёж электромагнитной системы рабочего макета модернизированного плунжерного насоса показан на рисунке 17.

Были проведены испытания макета на величину силы, действующей на якорь плунжерного насоса и расстояние перемещения якоря. При подаче на каждую из катушек напряжения питания 24 В была зафиксирована вертикальная составляющая силы на якоре $F=57$ кг при перемещении плунжера на 4,1 мм.

Итоги

Успешно модернизирована конструкция электромагнитной системы плунжерного насоса.

Выводы

Применение численных методов позволило решить задачу модернизации плунжерного насоса системы одоризации газа без многочисленных экспериментов и материальных затрат на изготовление оснастки. Кроме того, без численных экспериментов невозможно было бы добиться приемлемых результатов в ограниченные сроки и определить необходимые изменения некоторых геометрических размеров магнитопровода и зоны контакта якоря с магнитопроводом. Показана возможность успешного применения численных методов при частичном отсутствии или противоречивости характеристик материалов объекта. Получена хорошая согласованность расчётных и экспериментальных данных.

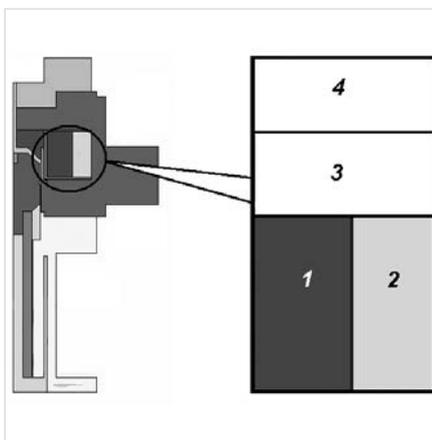


Рис. 14 — Варианты обмоток катушек электромагнитной системы насоса

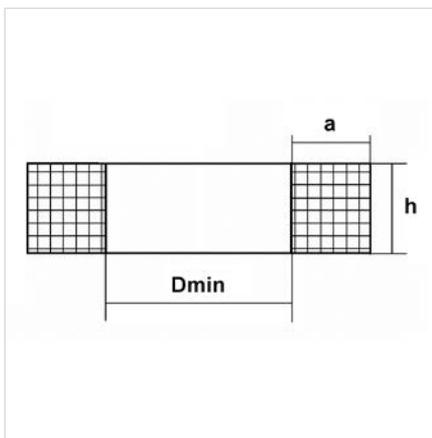


Рис. 15 — Геометрические параметры катушки

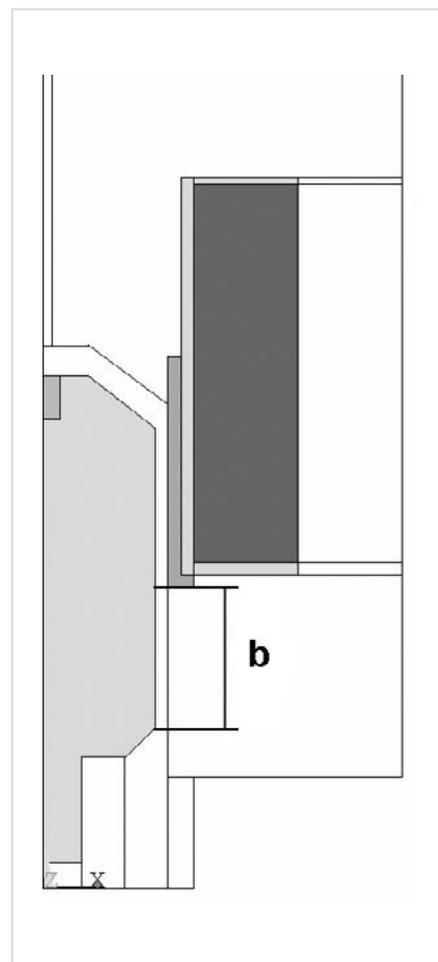


Рис. 16 — Расположение якоря относительно катушки. b — боковая зона контакта якоря и магнитопровода

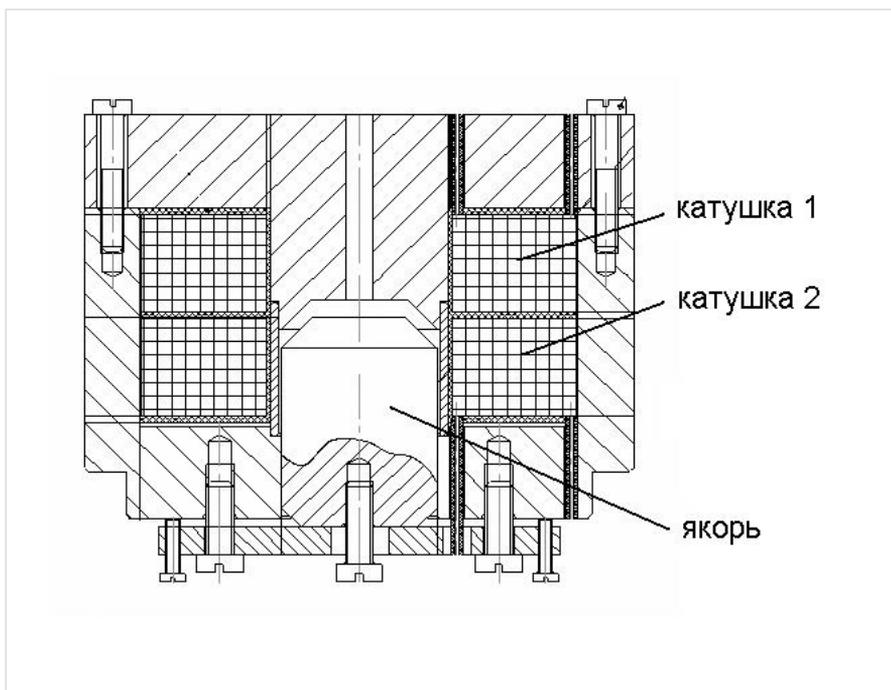


Рис. 17 — Чертёж рабочего макета

Список использованной литературы

1. Б.К. Буль. Основы теории и расчёта магнитных цепей. М., 1964.
2. А.В. Гордон, А. Г. Сливинская. Электромагниты постоянного тока. М., 1960.