

## МОДЕЛИРУЮЩИЙ КРИОГЕННЫЙ СОЛЕНОИД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА

Юферов В.Б., д.т.н., Шарый С.В., Друй О.С., Сероштанов В.А., Ильичёва В.О.  
 Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"  
 Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая 1,  
 тел. (+380 57 3356326), e-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua

*Спроектван, розрахован та виготовлен у лабораторних умовах крупногабаритний криосоленоїд з невакуумованим криостатом. Експериментально одержані характеристики соленоїду та його теплофізичні параметри добре узгоджуються з розрахунками та показують межі можливого застосування соленоїду для проведення експериментів на електромагнітному сепараторі елементів.*

*Спроектирован, рассчитан и изготовлен в лабораторных условиях крупногабаритный криосоленоид с невакуумируемым криостатом. Экспериментально полученные характеристики соленоида и его теплофизические параметры хорошо согласуются с расчетными и показывают границы возможного применения соленоида для проведения экспериментов на электромагнитном сепараторе элементов.*

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1 - 2] рассмотрено несколько модификаций плазменных сепараторов элементов и изотопов, использующих ионный циклотронный резонанс. Представлены ориентировочные характеристики систем, входящих в состав сепаратора, величины и желаемое осевое распределение магнитного поля. Во всех модификациях основной системой является магнитная, определяющая энергозатраты, материалоемкость, стоимость и габариты. Объем системы, приблизительно равный объему магнитного поля определяет производительность сепаратора и отчасти атомный вес продукта. Величина магнитного поля определяет атомный вес сепарируемой продукции. При создании сепараторов с объемами магнитного поля около  $1 \text{ м}^3$  и величинами магнитного поля до 0,3 Тл обмотки, как правило, изготавливаются тепловыми, т.е. работают при температуре около 300 К. При больших объемах или больших величинах магнитного поля используются криорезистивные или сверхпроводящие обмотки. Техника расчета и технология создания магнитных систем достигли совершенства, однако в ряде конкретных случаев нужны простые, эффективные и недорогие решения. При создании магнитной системы плазменного сепаратора [1] были использованы промышленно изготовленные тепловые обмотки, с рабочей температурой  $\sim 300 \text{ К}$ . Однако, имеющихся в наличии обмоток достаточно лишь на половину системы, поэтому необходимо создание такой же обмотки для второй части сепаратора.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ВЫБОР РЕШЕНИЙ

На рис. 1,а,б представлена схема экспериментального плазменного магнитного сепаратора ДИС-1. Проведенные расчеты и эксперименты показали, что имеющаяся система из восьми соленоидов может обеспечить необходимые магнитные параметры. Кроме того, в ней имеется большой "тепловой" запас при работе в квазистационарном режиме. Однако, изготовление второго подобного комплекта соленоидов в настоящее время затруднительно, не только из-за их большой стоимости, но также и из-за отсутствия изготовителей экспериментального оборудования таких габаритов.

Оценки показали, что при использовании криогенного охлаждения обмоток (до 80 К) количество ме-

ди может быть существенно уменьшено, особенно при работе в квазистационарном режиме с длительностью импульсов около 10 с и менее. Проблемой оставалось создание криостата на 80 К, который при таких габаритах обычно изготавливается в вакуумном исполнении. Изготовление больших криосоленоидов с вакуумными криостатами в настоящее время также трудно осуществимо из-за отсутствия производств соответствующего профиля, а потому окажется чрезвычайно дорогостоящим. Параметры соленоидов 1,2,3 (рис 1,а) представлены в табл. 1. Учитывая наш опыт [3], решено было провести изготовление криосоленоида в условиях ННЦ ХФТИ, при этом, исходя из возможностей производства, необходимо было разработать безстаночную технологию изготовления и соленоидов, и криостатов на 80 К, не вакууммируемых, с использованием бытовых теплоизолирующих материалов (оценки показывали, что в этом случае теплофизические параметры соленоида окажутся удовлетворительными).

Криогенный соленоид плазменного сепаратора, как видно из таблицы 1, должен иметь параметры: внутренний диаметр обмотки – около 580 мм, длина обмотки – 1500 мм, максимальная величина магнитного поля около 0,3 Тл для изотопов лития и около 0,6 Тл для изотопов бора и углерода.

Для  $H \approx 0,6 \text{ Тл}$  величина транспортного тока в обмотке должна быть около 1,5 кА ( $3 \text{ кА/см}^2$ ), и около 320 витков на метр. Имевшаяся в наличии медная шина с размерами  $25 \times 2 \text{ мм}^2$  при охлаждении до 80 К позволяла транспортировать указанный выше ток при тех же параметрах системы питания, что и для соленоидов 1. Таким образом, решением могло быть: либо создание восьми идентичных соленоидов, эквивалентных соленоиду 1, рис.1, либо создания моносоленоида, заменяющего все 8. Необходимость высокой однородности магнитного поля на длине системы рекомендовала создание моносоленоида с указанными выше параметрами, при этом снижался общий вес, габариты и энергозатраты. Собственно обмотка моносоленоида может изготавливаться в двух вариантах: послойно и в виде отдельных блинов. Для послойного варианта это около 60 витков в слое и 8 слоев. Медная шина электроизолировалась стеклолентой шириной 20 мм, толщиной 0,2 мм с просветом 5 мм и пропитывалась эпоксидной смолой в процессе намотки.

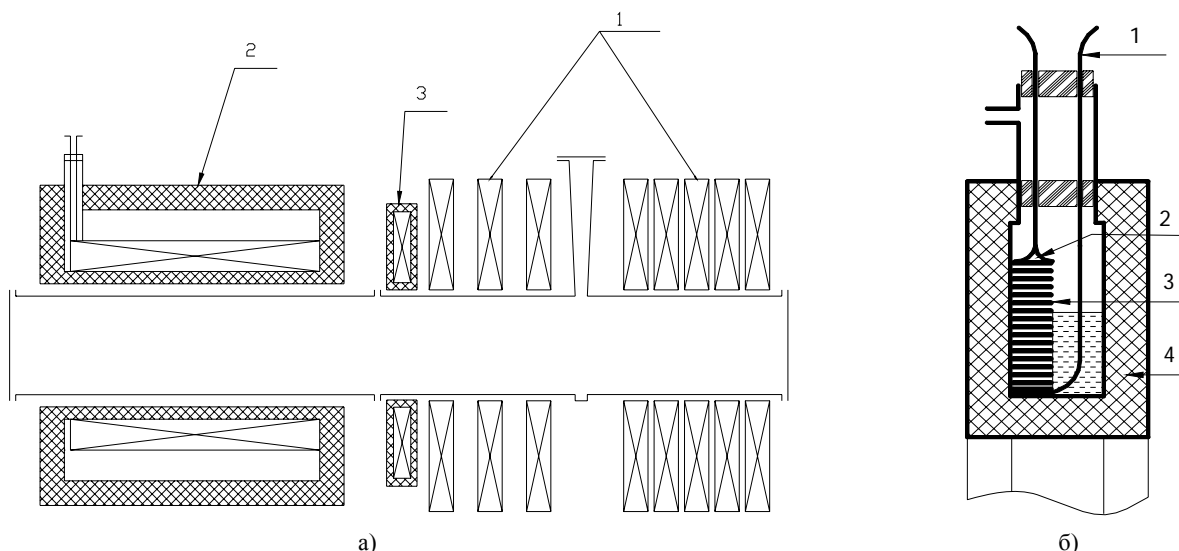


Рис. 1 а) Схематический вид магнитной системы сепаратора: 1 – дискретные промышленно изготовленные соленоиды; 2 – одиночный соленоид (должен быть создан); 3 – моделирующий криосоленоид (прототип соленоида 2); б) Схематический вид моделирующего криосоленоида: 1 – тоководы; 2 – термодатчик; 3 – обмотка; 4 – теплоизоляция

Таблица 1

Параметры соленоидов 1,2,3	1. Промышленный соленоид	2. Большой криосоленоид	3. Моделирующий криосоленоид
Внешний/внутренний диаметр/длина (по меди), мм	1140/480/95	605/580/1500	734/590/25
Внешний/внутренний диаметр теплоизоляции, мм	-	1000/480	910/490
Вес обмотки, кг/число витков/шина ммхмм	445/33 /12х40	450/400 / 25х2	25/28 / 25х2
Поле в центре на оси ( $I = 1500 \text{ A}$ ), Э	810	До $3 \cdot 10^3$	835
Намотка соленоида	Блинная 2 ряда	8 слоёв	Блинная 1 ряд
Объём криостата заполняемый азотом, л	-нет	~ 200	9

Таким образом, обмотка замоноличивается с помощью эпоксидной смолы ЭД-6, устойчивой при криогенных температурах. Однако в этом случае появлялась проблема, т.к. охлаждается криожидкостью только внешний слой медной обмотки, а температура внутренних слоев определяется теплопроводностью слоистой системы с послойным внутренним тепловыделением. В случае блинной намотки проблема теплопередачи тоже остается, хотя выглядит менее остро, так как охлаждаются только торцы шины через слой эпоксидной смолы и стеклотенты. Поэтому, в обоих случаях для определения оптимальной длительности импульса необходимы данные о величинах теплопередачи.

Следующим вопросом является вопрос прочности. Замоноличивание обмотки при отсутствии каркаса делает ее самонесущей, что возможно в условиях умеренных осевых пондеромоторных сил, не превышающих в нашем случае величины  $\sim 10 \text{ кН}$  (для двух соленоидов). Теплоизоляция криостата должна надёжно выдерживать эти осевые нагрузки без изменения теплофизических характеристик. В качестве теплоизоляции может быть выбран промышленный пенопласт (полистирол) для которого предельная величина нагрузки составляет  $\sim 40 \text{ Н/см}^2$ . Конструктивно соленоид выглядит следующим образом. Обмотка размещается во внутреннем сосуде с криагентом, далее теплоизоляция, которая должна размещаться во внешнем тонкостенном сосуде с внутренним диаметром 480 мм, внешним около 1000 мм, длиной  $\sim$

1700 мм. Пространство между стенками сосудов заполняется теплоизоляцией "по месту", после намотки обмотки и размещения ее в сосуде. Толщина слоя теплоизоляции 50-100 мм будет уточнена в процессе подготовительных моделирующих теплофизических экспериментов. Слой теплоизоляции набирался из блоков-пластин промышленного пенопласта.

Соединение блоков и заполнение полых труднодоступных объёмов производилось при помощи монтажной пены (однокомпонентный пенополиуретановый герметик в аэрозольной упаковке).

Основные вопросы для изучения: величина теплоподвода в не вакууммируемом криостате в холодном режиме и возможность поддержания магнитного поля с точностью до 1-2% в течение 3-10 с в замоноличиванной обмотке. Последний вопрос может звучать и иначе. Каковы допустимые условия теплопередачи в замоноличиванном соленоиде при различных плотностях транспортного тока и какова его конструкция?

Для отработки технологии изготовления, возможности реализации расчетных параметров, определения условий теплопередачи и охлаждения был рассчитан, спроектирован и изготовлен моделирующий соленоид – магнитный аналог одного из имеющихся в наличии промышленных соленоидов.

#### РАСЧЕТ И ОПИСАНИЕ

Габариты соленоида задаются параметрами сепаратора (табл. 1). Его схематический вид представлен на рис. 1,б. Для шины  $25 \times 2 \text{ мм}^2$  в адиабатическом при-

близости нагрев обмотки,  $\Delta T$ , может быть определен как  $I^2 \rho(R) \tau = cm \Delta T$ , где  $I$  – транспортный ток соленоида,  $\rho(R)$  – удельное сопротивление или сопротивление соленоида,  $\tau$  – длительность токового импульса,  $c$  – теплоемкость меди,  $m$  – удельная масса или масса обмотки. При токе 1 кА и температуре 77 К, темп нагрева обмотки составляет  $\sim 0,5$  К/с и тепловыделение около 0,4 Дж/см. При длительностях импульса в несколько секунд процесс не может быть чисто адиабатическим и дальнейшее повышение температуры будет ограничено теплопередачей в жидкость. Величиной, определяющей допустимые перепады температуры, становится величина  $\Delta B/B \approx 2\%$  – определяющая возможность работы сепаратора по разделению [1]. При этом в величину  $\Delta B$  входят и пространственные неоднородности магнитного поля, и изменение тока за счет нагрева обмотки, т.е. величина  $\Delta I/I$ .

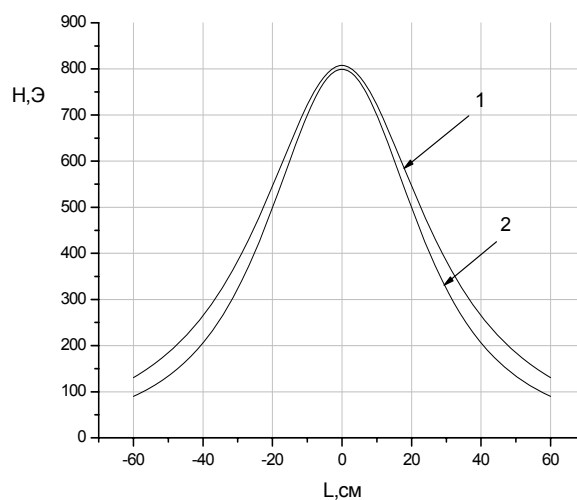
Особенностью криогенного моделирующего соленоида является то, что в его намотке используется шина с меньшим сечением при том же транспортном токе, что и в тепловых, т.е. с большей плотностью тока, вследствие чего сокращается средний диаметр соленоида и возможно сокращение числа витков. Это делает соленоид более тонким, имеющим более пикированное распределение магнитного поля. Однако, в данном моделирующем эксперименте, это не имело существенного значения и могло быть учтено при изготовлении основного образца. Это расчетное различие осевых распределений магнитного поля при приблизительно равных максимальных величинах представлено на рис. 2: а – расчетные зависимости (1 – промышленный соленоид, 2 – моделирующий соленоид), б – экспериментальные.

Для расчета магнитного поля использовалось соотношение [4]:

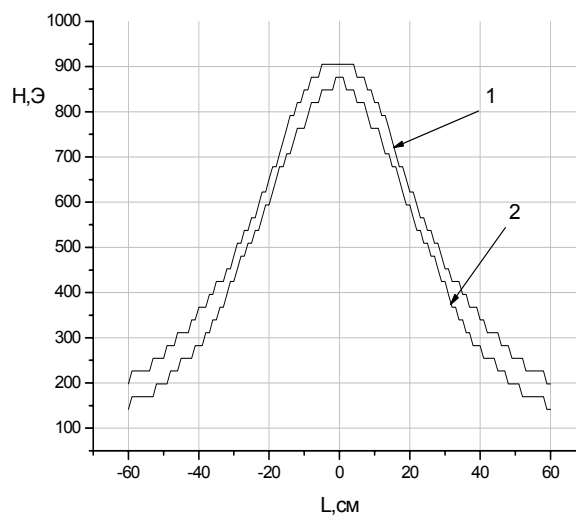
$$H(z) = 0,8\pi \frac{NI}{h} \frac{\frac{h}{2} - z}{b-a} \ln \left( \frac{b + \sqrt{b^2 + \left(\frac{h}{2} - z\right)^2}}{a + \sqrt{a^2 + \left(\frac{h}{2} - z\right)^2}} \right) + 0,8\pi \frac{NI}{h} \frac{\frac{h}{2} + z}{b-a} \ln \left( \frac{b + \sqrt{b^2 + \left(\frac{h}{2} + z\right)^2}}{a + \sqrt{a^2 + \left(\frac{h}{2} + z\right)^2}} \right),$$

где  $N$  – число витков,  $I$  – ток,  $h$  – ширина шины,  $a$  – внутренний радиус обмотки,  $b$  – внешний радиус обмотки,  $z$  – расстояние вдоль оси соленоида.

Для промышленного соленоида, см. таблицу 1, при токе  $I = 1500$  А величина магнитного поля в центре соленоида  $H_0 = 810$  Э. Поэтому для криосоленоида были выбраны параметры:  $N = 28$  число витков в один вертикальный ряд,  $h = 25$  мм,  $2a = 590$  мм (малый диаметр обмотки),  $2b = 674$  мм (большой диаметр обмотки); при токе  $I = 1500$  А величина  $H_0 = 835$  Э. Полный вес – 40 кг. В верхней точке внешнего витка криосоленоида укреплен на тепловой контакт угольный термодатчик, проградуированный по трем точкам от 290 до 64 К [5], по которому отслеживали динамику охлаждения и отогрева соленоида. Фото криосоленоида представлено на рис. 3.



а)



б)

Рис. 2. Распределение магнитного поля вдоль оси соленоидов: а) расчетное, б) измеренное

При выборе параметров криостата, определяющей величиной, кроме габаритов, является величина теплоподвода и тепловыделения, которые могут быть выражены, как:  $Q_{\Sigma} = Q_S + Q_I + Q_T$ , где  $Q_{\Sigma}$  – суммарный теплоподвод,  $Q_S = \lambda \cdot S \cdot \Delta T / l$  – теплоподвод через поверхность криостата в одномерном приближении, т.е. через теплоизоляцию, где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоизоляции;  $S$  – ее площадь;  $l$  – ее толщина;  $Q_I$  – тепловыделение в криостате при включении тока,  $I^2 \cdot R \cdot n \cdot \tau$ ;  $I$  – ток в обмотке;  $R$  – сопротивление обмотки;  $n$  – число импульсов;  $\tau$  – длительность импульса тока.  $Q_T$  – теплоподвод в криостат за счет токовыводов, определяется таким же выражением, уравнением Фурье, что и  $Q_S$ , только со своими величинами коэффициентов. При этом желательно, чтобы величина  $Q_S \leq Q_I$ . Однако величина  $Q_I$  является функцией нескольких параметров, которые диктуются условиями эксперимента. При определении теплоподводов трудно разделить величины первого и третьего членов, поскольку токовыводы охлаждаются потоком отходящих холодных паров и эффективные токовыводы в холостом режиме должны почти не давать теплоподвода к системе. Дополнительной теплофизической особенностью криосоленоида является то, что диаметр вертикально расположенной медной обмотки лишь немного отличается

от диаметра криососуда с жидким азотом, поэтому в процессе изменения уровня хладагента (ожидаемые) скорости его испарения будут длительное время приблизительно постоянными, до тех пор, пока уровень жидкости не снизится до нижнего края обмотки. Это связано с высокой теплопроводностью медной обмотки, практически усредняющей теплоподвод через всю поверхность теплоизоляции.



Рис. 3. Фото соленоида (вверху на патрубке видны токовводы, рядом трубка для залива криогента)

Как указывалось выше, теплоизоляция соленоида комбинированная, состоящая из промышленного пенопласта и монтажной пены. Теплопроводность этих материалов могла различаться из-за различных величин плотности, которую трудно сделать постоянной для монтажной пены - пенопласта, изготавливаемого "на месте". Такая же ситуация должна наблюдаться и для прочностных характеристик. Для определения теплопроводности были изготовлены два идентичных криостата из промышленного пенопласта и монтажной пены и проведены эксперименты. Существенным недостатком таких экспериментов является переменный уровень хладагента в криостате и связанная с ним переменная площадь теплопередачи. Поэтому в моделирующих теплоподвод криостатах были вставлены медные хладопроводы на всю высоту криостатов. Такая операция существенно изменила их теплофизические характеристики сделав тепловыделение постоянным, вернее слабо зависящим от уровня криожидкости. При расчете удельного теплоподвода в системе теплоизоляции использовалась средняя величина поверхности теплообмена  $S_{cp} = S_{max} + S_{min} / 2$ , где  $S_{max}$  и  $S_{min}$  внешняя и внутренняя поверхности теплоизоляции. При этом предполагается, что температура на внешней и внутренней поверхности равны соответственно 300 и 78 К. Последнее предположение,  $T_{внутр} = 78$  К было бы вполне приемлемым при малых размерах соленоида. Представлялось, что медная обмотка с ее хорошей теплопроводностью, около 5 Вт/см град в области 80 К, выглаживает температурные градиенты внутри криостата, делая перепады температу-

ры, на первый взгляд – малозаметными. Однако, как будет видно из результатов эксперимента, для больших соленоидов, с распределенным по поверхности теплообменом и переменным уровнем хладагента – теплоперепады становятся существенными. Кроме того, радиальная теплопроводность обмотки существенно ухудшается за счет межвитковой электроизоляции.

Измерения показали, что средние величины теплопроводности для обоих материалов оказались примерно одинаковыми и равными  $2,14 \cdot 10^{-4}$  Вт/смК для пенопласта и  $2,07 \cdot 10^{-4}$  Вт/смК для пены соответственно. Полученные значения теплопроводностей хорошо согласуются со справочными данными.

Таким образом расчетные величины  $Q_S$  и  $Q_T$  составили соответственно 45 и 19 Вт соответственно, при толщине теплоизоляции в 5 см.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Процесс охлаждения соленоида от 290 до 77 К потребовал 35 л жидкого азота, при этом отношение электросопротивлений обмотки составило  $\rho_{290}/\rho_{77} = 7,9$ . Экспериментально полученная величина теплоподвода составила 75 Вт.

После заполнения криостата жидким азотом и установления скорости испарения с интервалом в 10 минут начали даваться 10 с токовые импульсы, величиной около 525 А, что отмечено всплесками на кривой 1 рис. 4, на котором представлены результаты эксперимента.

Три импульса длительностью в 30 с отмечены большими амплитудами всплесков на кривой 4. Скорость фонового испарения холостого хода, определяющаяся теплоподводом через теплоизоляцию и от токовводов, в начальный момент составляет 1,6 л/час жидкого азота и остается приблизительно постоянной до времени 100 мин, после чего остается постоянной до времени ~ 200 мин. Отношение величин токового испарения хладагента к общему, при данных величинах тока, составляет около 25%.

Сопоставление кривых на рис 4. показывает, что для данной плотности тока имеется по крайней мере 4 области уровней жидкого азота, относящиеся друг к другу приблизительно как: 1,0/0,75/0,5/0,25, в которых наблюдаются различные скорости испарения хладагента, но приблизительно равные в пределах области. Три первых импульса не изменяют температуры верхнего участка витка с термодатчиком, затем наблюдается его постоянный рост, что определяется понижением уровня хладагента. При этом, в течение длительного времени величина тока в импульсе остается постоянной. Это свидетельствует о том, что среднее увеличение температуры обмотки и, соответственно ее сопротивления – незначительно. Временной интервал в 10 мин между импульсами выбран по времени установления постоянства показаний температурного датчика после токового импульса. Величина сопротивления при увеличении количества импульсов постепенно увеличивалась. Как видно, после достижения экваториального (половина) уровня жидкости, отмечается падение амплитуды токового импульса и снижение пиковой величины испарения хладагента, что указывает на увеличение времени теплосъема-теплопередачи, возрастания градиентов температуры в обмотке и существенное повышение сопротивления обмотки.

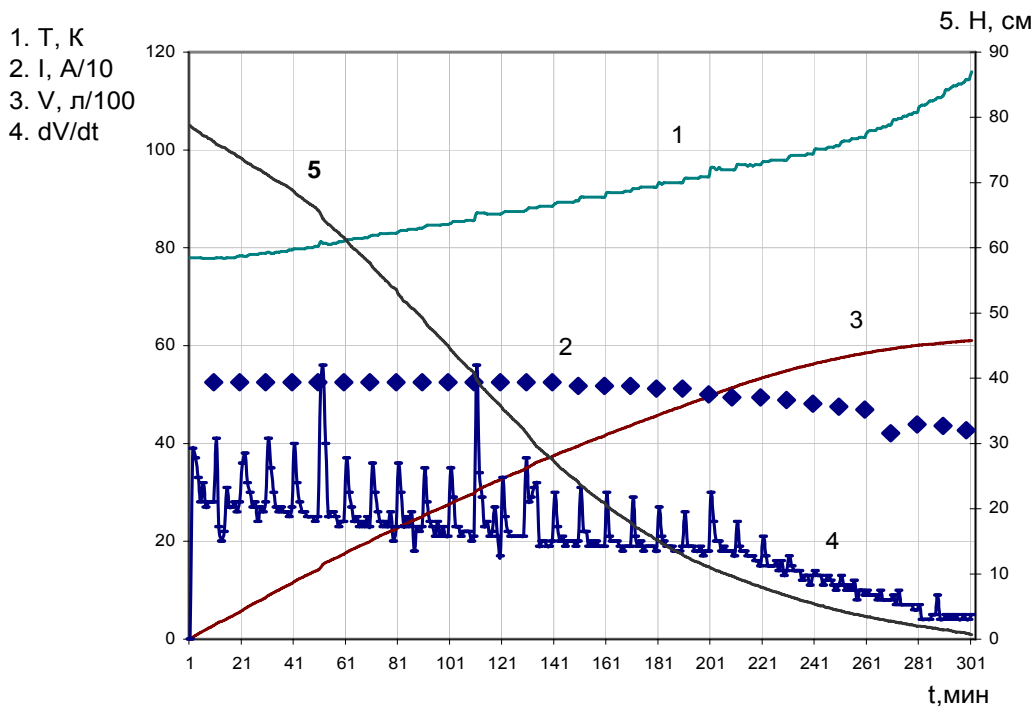


Рис. 4

1 - температура верхней точки внешнего витка; 2 - импульсы тока в обмотке, длительностью 10 сек, за исключением 5-го и 11-ого - 30сек; 3 - количество испарившегося газа со временем; 4 - зависимость скорости испарения от времени; 5 - уровень хладагента

В режиме холостого хода, максимальная температура на верхней части соленоида возрастает на 7-9 К. Снижение уровня хладагента ниже четверти высоты связано с дальнейшим ухудшением условий теплопередачи, из-за снижения площади теплосъема и значительным ростом сопротивления обмотки. Следует также заметить, что вследствие замоналичности обмотки, тепло передается в жидкость с одной боковой поверхности шины, составляющей всего лишь 10% периметра шины. Этого, очевидно, хватает для пузырькового режима теплообмена лишь при большой площади теплообмена с жидкостью. Резкое уменьшение амплитуд, соответствующих токовым импульсам, на кривой испарения при малых уровнях хладагента, при малом изменении тока, может свидетельствовать о пленочном режиме теплопередачи и увеличении времени охлаждения. Одним из путей уменьшения теплоподвода к системе является переход к трубчатым тоководам из нержавеющей стали. Применение которых резко сократит теплоподвод по ним в холостом режиме, поскольку в данном случае величина  $Q_s \leq Q_l$ .

#### ВЫВОДЫ

Разработана технология, рассчитан и создан в условиях ограниченной производственной базы крупногабаритный криосоленоид. По своим рабочим параметрам он не уступает промышленным, а по стоимости является значительно более выгодным. Расчетные параметры удовлетворительно согласуются с экспериментальными. Проведены исследования соленоида, показавшие границы, когда удовлетворяются требования выполнения экспериментальных параметров сепаратора. Определены теплофизические параметры теплоизоляции. Определены направления улучшения этих характеристик в подобного рода устройствах, указано

на роль теплообмена и теплосъема. Для более стабильной работы на больших плотностях токов целесообразно улучшение условий теплопередачи в обмотке, не в ущерб электроизоляции и прочности.

Для надежной длительной работы соленоида необходима система автоматического поддержания уровня жидкости в пределах 100-50%: в этой области уровней криожидкости, при этом токовые характеристики будут удовлетворять условиям эксперимента на сепараторе.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Довбня А.Н., Друй О.С., Егоров А.М., Ильичева В.О., Лапшин В.И., Сосипатов М.В., Швец О.М., Юферов В.Б., Винников Д.В., Ковтун Ю.В. Сравнительный анализ проектов плазменных сепараторов изотопов, с колебаниями на циклотронных частотах. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения №4. 2004 г. – С. 51-57.
- [2] Довбня А.Н., Егоров А.М., Швец О.М., Юферов В.Б., Невструев С.В. Концепционный проект плазменного резонансного сепаратора. // ВАНТ серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (3), № 4, 2003 г. – С. 323-325.
- [3] Бредихин М.Ю., Гласов Б.В., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Низкотемпературные соленоиды для получения сильных магнитных полей // ЖТФ, №10, 1971. – С. 2226-2229.
- [4] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: "Мир", 1972г. – С. 34-62.
- [5] Hetzler M.C., Walton D. New Interpolation Formula for Carbon Resistance thermometry. // Rev. Sci. Instr. 39 (1968), с.11, s. 1656.

Поступила 1.06.2006