

PACS: 07.20.Mc, 07.55.Db, 84.32.Nh, 84.71.Ba, 84.71.Mn

Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Е.А. Дворников, Д.О. Федюк, А.Я. Лаптиенко

## СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА КРИОМАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2016 года

*Описана сверхпроводниковая магнитная система (СМС) криомагнитного сепаратора сухого обогащения, состоящая из трех последовательно соединенных соленоидов с параллельными осями, установленных в одной плоскости друг за другом. Приведены результаты разработки и испытаний трех соленоидов с внутренним диаметром 300 мм, которые создают магнитное поле с индукцией 5 Т и имеют запасенную энергию магнитного поля более 300 кДж. Представлены результаты испытаний магнитной системы в виде блока трех соленоидов, установленной в рабочем криостате. Измерено пространственное распределение магнитного поля в рабочей зоне сепарации. Индукция магнитного поля в зоне сепарации равна 1–2 Т, а неоднородность поля на длине 1200 мм не превышает 11%. Приведены оценки сил магнитного взаимодействия соленоидов в составе магнитной системы, которые достигают 6 т.*

**Ключевые слова:** сверхпроводниковый соленоид, магнитная система, индукция магнитного поля, энергия магнитного поля, механические усилия, критический ток, сила магнитного взаимодействия, индуктивность, распределение магнитного поля

Одной из актуальных проблем промышленности является реализация проектов по разработке технологий обогащения полезных ископаемых и их глубокой очистки.

В таких сложных технологических процессах широко используются магнитные сепараторы. Это, как правило, установки непрерывного действия (производительностью 20–100 т/ч) с вращающимися роторами или барабанами, в которых через зазор между полюсами магнитов протекает пульпа, несущая предварительно раздробленную (менее 0.1 мм) железную руду. Сильномагнитные частицы железосодержащих соединений притягиваются к магнитным полюсам, выносятся вращающимся ротором из магнитного поля и смываются струей воды в накопитель обогащенного магнитного продукта. Немагнитные и слабомагнитные (парамагнитные) примеси, которые не взаимодействуют с полюсами магнитов, выносятся в шламоотстойник или отвалы.

Источниками магнитного поля в таких сепараторах служат в основном электромагниты, включающие в себя магнитопроводы с обмотками из медных шин. Эти многотонные конструкции, потребляемая мощность которых (100–200 кВт) полностью превращается в тепло, создают магнитное поле с индукцией не более

0.6–1.0 Т [1]. При их эксплуатации затраты только по оплате электроэнергии превышают 500 тыс. руб. в год.

Альтернативным решением является использование в сепараторах в качестве источника магнитного поля сверхпроводниковых соленоидов, в которых величина тока достигает нескольких сотен ампер. Если же начало и конец обмотки соленоида замкнуть сверхпроводниковым ключом, ток будет протекать бесконечно. При этом соленоид не потребляет электроэнергию и становится источником постоянного магнитного поля, индукция которого в 5–10 раз выше, чем у обычного электромагнита. Электроэнергия используется только на охлаждение гелия, в результате чего эксплуатационные затраты криомагнитной системы по этому показателю в 20–30 раз ниже, чем у электромагнита. Примерно во столько же раз масса такой системы меньше массы электромагнита.

Эффективность процесса магнитной сепарации определяется величиной магнитной силы, действующей на находящуюся в зоне сепарации магнитную частицу. Эта сила равна произведению магнитной восприимчивости материала частицы, ее объема, величины магнитного поля и его градиента [2]:

$$F = \frac{M}{4\pi} \text{grad} \mathbf{B} V, \quad (1)$$

где  $F$  – магнитная сила, Н;  $M$  – намагниченность частицы, А/м;  $\text{grad} \mathbf{B}$  – градиент магнитной индукции, Т/м;  $V$  – объем частицы, м<sup>3</sup>.

В свою очередь, намагниченность вещества равна

$$M = \chi H, \quad (2)$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость вещества;  $H$  – напряженность внешнего магнитного поля, А/м.

Из выражений (1) и (2) следует, что для данного вещества с магнитной восприимчивостью  $\chi$  и объемом частицы  $V$  магнитная сила прямо пропорциональна величине внешнего магнитного поля и градиенту магнитной индукции.

В настоящей работе рассматривается СМС экспериментального образца криомагнитного сепаратора для сухого обогащения отходов железорудного производства. К системе предъявляются нетрадиционные требования по пространственному распределению магнитного поля в зоне магнитной сепарации, а именно зона сильного магнитного поля представляет собой параллелепипед с размерами сторон 1200×200×100 мм. Большая сторона длиной 1200 мм расположена в направлении движения исходного продукта обогащения. Ширина зоны магнитного поля равна 200 мм, а высота в направлении вектора поля – не менее 100 мм. Минимальное значение индукции магнитного поля в наиболее отдаленных точках рабочей зоны не менее 1 Т, при этом зона сепарации располагается не в центральном (максимальном) поле внутри криомагнитной системы, а вне ее – под дном криостата, т.е. в поле рассеивания СМС.

Указанная протяженность зоны магнитного поля обуславливает особые требования к конструкции СМС. Простейшим решением было бы выполнение системы в виде одиночного сверхпроводникового соленоида цилиндрической формы. Для обеспечения зоны магнитного поля длиной 1200 mm средний диаметр обмотки соленоида должен быть не менее 1300 mm, а высота – около 600 mm. При этом вес такой обмотки составит более 500 kg, что исключает возможность использования такого соленоида.

Для создания вышеуказанной зоны магнитного поля более приемлемой конструкцией является соленоид с эллиптической формой обмотки [6], большая ось которой расположена в направлении зоны длиной 1200 mm, а меньшая – в направлении зоны длиной 200 mm. К недостаткам такого соленоида относятся сложность намотки и необходимость компенсации чрезвычайно больших растягивающих механических усилий магнитного происхождения на линейных участках обмотки, достигающих нескольких сотен тонн.

С целью избежать указанных недостатков нами разработана новая конструкция СМС, создающая заданную величину магнитного поля в зоне сепарации. Система состоит из трех одинаковых соленоидов цилиндрической формы с параллельными осями, последовательно соединенных и установленных в одной плоскости один за другим в направлении большой стороны зоны магнитного поля. Такая конструкция СМС в первом приближении моделирует соленоид с эллиптической формой обмотки. Проведены расчеты и выбрана оптимальная конструкция одного сверхпроводникового соленоида. Исходные требования к соленоиду следующие:

- а) индукция магнитного поля в центре не менее 5 Т;
- б) рабочий ток не более 250 А;
- в) максимальный внешний диаметр обмотки не более 390 mm, что обусловлено использованием для испытаний соленоида криостата с диаметром гелиевой емкости 400 mm;
- г) учет величины магнитного поля внутри обмотки соленоида, которое всегда превышает поле в его центре;
- д) неоднородность магнитного поля в зоне магнитной сепарации не более 10–12%.

В виду того, что магнитное поле в рабочей зоне сепарации – это не центральное поле соленоида, а поле рассеивания, его величина тем больше, чем больше диаметр внутреннего отверстия обмотки и чем меньше ее длина. С другой стороны, выполнять соленоид малой длины недопустимо, так как сокращается число ампер-витков и соответственно уменьшается величина магнитного поля при заданном токе. При выборе размеров соленоида также необходимо учитывать то обстоятельство, что максимальное магнитное поле достигается не в геометрическом центре, а на внутренних слоях обмотки соленоида, и чем меньше длина обмотки, тем больше отличие полей. Например, у соленоида с приведенной к внутреннему радиусу  $a_1$  длиной  $b$ , равной  $b/a_1 = 0.5$ , и приведенной толщиной обмотки  $a_2/a_1 = 1.2-2$  (где  $a_2$  – внешний радиус обмотки [3]) отношение максимально поля в обмотке к центральному равно 1.5. То есть, если магнитное поле в цен-

тре равно 5 Т, то поле в обмотке равно 7.5 Т. Эту ситуацию учитывают при проектировании сверхпроводниковых соленоидов для возбуждения сильных магнитных полей, используя зависимость критического тока от индукции магнитного поля.

Следующим фактором, который важен при создании СМС, являются механические напряжения в обмотке. В соленоиде ток течет под прямым углом к направлению магнитного поля, и лоренцево взаимодействие между током и полем создает механические напряжения, которые стремятся разорвать обмотку в радиальном направлении и сжать вдоль оси. Силу, действующую на виток радиусом  $a$ , когда векторы поля и тока направлены под прямым углом друг к другу, можно выразить в виде

$$F = 2\pi caIH, \quad (3)$$

где  $F$  – сила, kg;  $c = 10^{-6}/9.8$ ;  $I$  – ток, А;  $H$  – магнитное поле, Ое. Например, на виток радиусом 10 см, по которому протекает ток 250 А в поле 9800 Ое действует растягивающая сила величиной 15.7 kg.

С учетом приведенных требований было рассчитано несколько вариантов сверхпроводящих соленоидов. В качестве рабочего варианта был выбран соленоид, обмотка которого имеет следующие размеры: диаметр внутреннего отверстия 300 mm, внешний диаметр 384 mm, длина 180 mm. Для изготовления соленоида необходимо 50 kg сверхпроводникового провода сплава НТ-50. Расчетное значение индуктивности обмотки равно 11 Н, а запасенная в соленоиде энергия магнитного поля при токе 250 А не менее 350 kJ. По геометрическим размерам, весу и запасенной энергии магнитного поля такой соленоид относится к классу средних, поэтому технология изготовления, применимая к малым лабораторным соленоидам (диаметр внутреннего отверстия до 100 mm и запасенная энергия до 200 kJ) становится непригодной. Это обусловлено рядом причин, и самая важная из них заключается в том, что запасенная в соленоиде энергия возрастает настолько, что резкий переход в нормальное состояние может сопровождаться не только очень бурным вскипанием жидкого гелия, но и повреждением обмотки за счет локального нагрева и перенапряжений.

Вторая причина связана с тем, что по мере увеличения размеров обмотки соленоида (в первую очередь за счет возникновения больших механических усилий) становится все труднее достигнуть в ней величины критического тока без надлежащей тепловой стабилизации. В большинстве современных соленоидов средних размеров используется сверхпроводник, полностью стабилизированный в тепловом отношении. Для этого в обмотке соленоида выполняют каналы для прохождения охлаждающего жидкого гелия или используют полностью стабилизированный провод с малым (5–7%) коэффициентом заполнения по сверхпроводнику. Остальная часть сечения провода (около 95%) заполнена материалом с высокими тепло- и электропроводностью, например медью и реже – алюминием. Однако значения критического тока для такого провода существенно меньше, чем для частично стабилизированного провода, у которого коэффициент заполнения по сверхпроводнику составляет 30–50%. Применение полностью стабилизированно-

го провода ведет к существенному (в 5–10 раз) увеличению размеров и веса обмотки соленоида. В качестве альтернативы было решено использовать как намоточный частично стабилизированный провод сплава НТ-50 с коэффициентом заполнения по сверхпроводнику не более 30%. Использовался многожильный провод диаметром 1.2, 1.0 и 0.85 mm.

Сверхпроводниковые соленоиды были изготовлены по бескаркасной технологии путем замоноличивания обмотки эпоксидной композицией УП-6-101 с наполнителем – мелкодисперсным β-эвкрититом марки Ситалл-ЭА-1-6 [4] с использованием технологической оснастки для намотки. Оснастка представляет собой разборный цилиндрический каркас, состоящий из двух фланцев и трубы, разрезанной на три сегмента вдоль образующей. Во фланцах с внутренней стороны каркаса выполнены кольцевые проточки, в которых фиксировали сегменты трубы. Стягивание фланцев с сегментами трубы осуществляется шпилькой с гайками, которая проходит через центральное отверстие каркаса. Собранный конструкцию устанавливали на намоточном станке. Трубу каркаса изолировали локотканью толщиной 0.15 mm в один слой, а с внутренней стороны фланцев устанавливали изоляторы из текстолита толщиной 1 mm и внешним диаметром, равным внешнему диаметру обмотки.

Обмотки соленоидов состоят из пяти секций, выполненных из провода различного диаметра, mm: 1.2 (одна секция), 1.0 (две) и 0.85 (две). Характеристики обмоток для трех соленоидов представлены в таблице.

Таблица

Характеристики обмоток соленоидов

Диаметр провода, mm	Соленоид 1		Соленоид 2		Соленоид 3	
	Число витков	Магнитная постоянная, Т/А	Число витков	Магнитная постоянная, Т/А	Число витков	Магнитная постоянная, Т/А
1.2	1140	0.0216	1324	0.0215	1142	0.0216
1.0	3550		3136		3560	
0.85	1780		1960		1770	

После завершения намотки соленоид вместе с технологической оснасткой помещали в сушильный шкаф и при температуре 80°C в течение 24 h производили полимеризацию эпоксидной смолы. Затем с замоноличенной обмотки удаляли технологическую оснастку и снаружи обмотки устанавливали бандаж. Последний служит для компенсации растягивающих механических усилий в обмотке и выполнен в виде цилиндрической обечайки из стали 12X18H10T толщиной 2 mm. Сверху к обечайке приварен фланец толщиной 10 mm, на котором установлена контактная плата из текстолита, на медные дорожки которой напаяны выводы обмотки соленоида. Радиальный зазор между бандажом и обмоткой величиной 1–1.2 mm заполнен эпоксидной смолой. Секции обмотки зашунтированы защитными резисторами из нихромового провода диаметром 2 mm. Внешний вид бескаркасной обмотки соленоида представлен на рис. 1.

Для регистрации момента перехода соленоида и определения секции, которая первой перешла в нормальное состояние, параллельно каждой секции подключен диод с лампочкой. Так как процесс перехода соленоида в нормальное состояние быстротечный ( $< 0.1$  s), момент перехода и загорания лампочек регистрировали фотокамерой.

Испытания соленоидов проводили в гелиевом криостате КГ-400. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 2. Для экономии жидкого гелия внутри соленоида размещали герметичную балластную емкость диаметром 280 mm, длиной 300 mm и объемом 1.85 l. Цель испытаний – определение максимального критического тока соленоидов. У соленоидов, компаундированных различными связующими, как правило, наблюдается эффект «тренировки», который заключается в увеличении критического тока от перехода к переходу из сверхпроводникового в нормальное состояние.

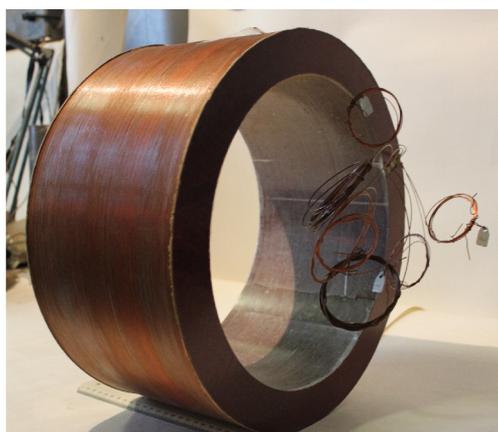


Рис. 1. Бескаркасная обмотка соленоида



Рис. 2. Экспериментальная установка для испытания соленоидов

Испытания первого соленоида показали, что у него отсутствует эффект «тренировки», поэтому в его обмотку был введен ток величиной 242 A без перехода в нормальное состояние. При этом токе индукция магнитного поля в центре соленоида составила 5.23 T, а максимальное поле в обмотке – 7.5 T. Ток свыше 242 A в соленоид не вводили, поскольку запасенная в соленоиде энергия магнитного поля составила 322 kJ и была вероятность повреждения обмотки. Повторные испытания по истечении двух месяцев показали, что соленоид «помнит» ранее достигнутое значение тока.

Несмотря на то, что все три соленоида изготовлены по одной технологии, второй и третий соленоиды при испытаниях вели себя иначе – у них имела место «тренировка» критического тока. Например, критический ток второго соленоида достигал значений 190, 217.5 и 224 A. Ввиду отсутствия жидкого гелия дальнейшие испытания второго соленоида были возобновлены через полтора месяца. Испытания показали, что критический ток после первого перехода соленоида в нор-

мальное состояние уменьшился от ранее достигнутого значения 224 до 220 А. Следующее значение критического тока составило 232.5 А. При этом индукция магнитного поля в центре соленоида равнялась 5.05 Т, а запасенная энергия поля – 295 кДж.

Испытания третьего соленоида позволили достичь значения тока 220 А после двух переходов в нормальное состояние. Дальнейшие испытания были приостановлены вследствие короткого замыкания в первой секции и выгорания нескольких витков обмотки. Поврежденную секцию обмотки удалили и на ее место установили новую. После третьего перехода соленоида достигнута величина тока 231 А. На этом испытания соленоида завершили, так как магнитное поле в центре соленоида и запасенная энергия были практически равны таковым для второго соленоида. Изготовленные сверхпроводниковые соленоиды были установлены в гелиевой емкости рабочего криостата [7] и объединены в блок магнитов – СМС (рис. 3). Расстояние между центрами соленоидов 440 мм, при этом обмотки

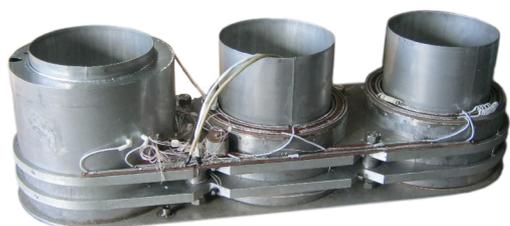


Рис. 3. СМС из трех соленоидов

крайних соленоидов включены встречно обмотке среднего, а к началу и концу СМС подсоединен сверхпроводниковый ключ, обеспечивающий короткозамкнутый режим работы. Такое соединение обмоток соленоидов в блоке магнитов увеличивает модуль магнитной индукции в рабочей зоне примерно на 12% по сравнению с согласным включением соленоидов.

Для компенсации механических усилий магнитного взаимодействия соленоидов и между собой, и с элементами конструкции криостата в гелиевой емкости криостата размещено устройство компенсации. Оно представляет собой установленные с зазором по высоте три параллельные плиты из алюминиевого сплава Д16Т каждая толщиной 20 мм с отверстиями. В этих плитах закреплены соленоиды так, что силовая нагрузка от них действует только на плиты, одновременно защищая соленоиды от возможного разворота осей и не нагружая элементы конструкции гелиевой емкости криостата. Конечно, силовое взаимодействие между соленоидами не исчезло и передается на витки соленоидов.

Силу магнитного взаимодействия двух соленоидов с параллельными осями, установленных в одной плоскости, можно вычислить из энергетических соображений. Известно, что запасенная в соленоиде энергия магнитного поля равна

$$U = \frac{LI^2}{2}, \quad (4)$$

где  $L$  – индуктивность, Н;  $I$  – ток, А.

Изменение энергии магнитного поля системы соленоидов при возможном их перемещении равно произведению силы, действующей между соленоидами, на величину виртуального перемещения:

$$\frac{dU}{dx} = F = \frac{c}{2} \left[ \frac{\Delta L I^2}{\Delta x} \right], \quad (5)$$

где  $F$  – сила, кг;  $\Delta L$  – изменение индуктивности, Н;  $\Delta x$  – величина виртуального перемещения соленоида, см;  $c = 10^2/9.8$ .

Общая индуктивность системы из двух соленоидов складывается из собственных индуктивностей и взаимной индуктивности между ними:  $L = L_1 + L_2 + 2M$ , где  $M$  – взаимная индуктивность. Изменение индуктивности двух соленоидов при их перемещении обусловлено изменением только взаимной индуктивности. Экспериментально измеренная индуктивность соленоидов составила 10.9 Н.

Расчеты взаимной индуктивности согласно [6] показали, что при межцентровом расстоянии между двумя соленоидами  $x_1 = 440$  мм (на таком расстоянии они установлены в блоке магнитов) их взаимная индуктивность  $M_1 = 0.48$  Н, а после виртуального перемещения одного из соленоидов на  $\Delta x = 50$  мм и соответственно увеличения расстояния между ними до  $x_2 = 490$  мм взаимная индуктивность  $M_2 = 0.40$  Н. Соответственно изменение индуктивности  $\Delta L = 2\Delta M = 0.16$  Н. Тогда согласно (5) при токе  $I = 150$  А сила магнитного взаимодействия двух соленоидов  $F = 3.6$  т, а при  $I = 200$  А  $F = 64$  т.

При испытании блока сверхпроводниковых соленоидов как единого целого в рабочем криостате произошел переход в нормальное состояние при  $I = 136$  А с выделением громадного количества энергии в виде тепла и с испарением всего жидкого гелия из криостата. Сила магнитного взаимодействия двух соседних соленоидов составила  $\sim 3$  т, которая, по-видимому, и спровоцировала переход соленоидов в нормальное состояние. Повторно в магнитную систему был введен ток  $I = 150$  А и «заморожен» сверхпроводниковый ключ. Ток большей величины не вводился, так как непредсказуемый переход в нормальное состояние мог привести к повреждению обмоток соленоидов, а возможно, и криостата. Запасенная энергия магнитного поля при  $I = 150$  А составила более 0.5 МДж.

Величину и пространственное распределение магнитного поля в рабочей зоне (под дном криостата) определяли с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8 на базе датчика Холла. Измеряли компоненты индукции магнитного поля  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$ , по значениям которых вычисляли модуль индукции магнитного поля. Результаты расчетов модуля индукции поля вдоль большой стороны рабочей зоны длиной 1200 мм при двух значениях координаты (расстояния от

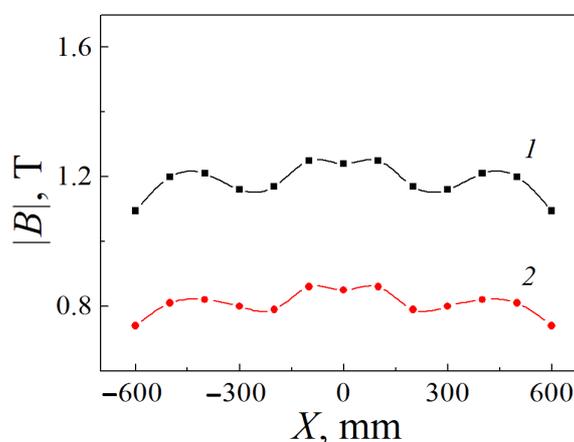


Рис. 4. Распределение модуля магнитной индукции вдоль большой оси СМС при токе 150 А: 1 –  $Z = 25$  мм, 2 –  $Z = 75$  мм

дна криостата)  $Z = 25$  mm и  $Z = 75$  mm при токе  $I = 150$  А приведены на рис. 4. Из хода кривых видно, что относительная неоднородность магнитного поля не превышает 11%.

В заключение отметим, что СМС обеспечивает режим «замороженного» магнитного потока путем использования сверхпроводникового ключа, который существенно повышает экономичность работы криомагнитной системы за счет возможности удаления из криостата сильноточных тоководов после «замораживания» ключа и отключения от сети источников питания.

Таким образом, при выполнении работы по созданию СМС сепаратора получены следующие результаты.

1. Разработаны сверхпроводниковые соленоиды среднего класса с диаметром внутреннего отверстия 300 mm, создающие магнитное поле с индукцией не менее 5 Т в центральной зоне и запасенной энергией более 300 kJ.

2. На базе соленоидов сконструирована магнитная система, состоящая из трех последовательно соединенных соленоидов и создающая в рабочей зоне сепарации (за пределами криостата) длиной 1200 mm, шириной 200 mm и высотой 100 mm магнитную индукцию до 1.5 Т.

3. Неоднородность магнитного поля в рабочей зоне на длине 1200 mm не более 11%.

4. Расчеты силового магнитного взаимодействия соленоидов в составе СМС показывают, что сила магнитного взаимодействия двух соседних соленоидов достигает 6 t и более, что требует особой их конструкции.

1. В.Ф. Сумцов, Электромагнитные железоотделители, Машиностроение, Москва (1978).
2. К.Н. Unkelbach, H.D. Wasmuth, XV International Mineral Processing Congress, 2–9 Jule, 1985, T. 1, p. 371–380.
3. Д. Монтгомери, Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов, Мир, Москва (1971).
4. А.с. СССР № 1210443, Полимерная композиция (публикации не подлежит).
5. П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин, Расчет индуктивностей, Энергоатомиздат, Ленинград (1986).
6. Патент № 743567, Магнитный барабанный сепаратор, Опубликовано 25.06.80. Бюл. № 23.
7. П.Н. Постол, Е.А. Дворников, Д.В. Варюхин, ФТВД **23**, № 4, 128 (2013).

*D.V. Varyukhin, N.V. Taryanik, E.A. Dvornikov, D.O. Fedyuk, A.Ya. Laptienko*

## SUPERCONDUCTING MAGNETIC SYSTEM OF A CRYOMAGNETIC SEPARATOR

A superconducting magnetic system (SMS) of a cryomagnetic separator of dry separation is described that is composed by three concatenated solenoids with the parallel axes located in the same plane one after another. The results of the design and the tests of three solenoids of 300 mm in internal diameter are presented. The solenoids produce magnetic field characterized by field density of 5 T and the stored magnetic energy more than 300 kJ. The results of the test-

ing of the magnetic system in the form of a block of three solenoids fixed within a working cryostate are reported. Spatial distribution of magnetic field within the working zone of separation is measured. The field density in the separation zone is 1–2 T, and field inhomogeneity at the distance of 1200 mm does not exceed 11%. The estimations of the forces of magnetic interaction of solenoids within the magnetic system are presented that reach 6 t.

**Keywords:** superconducting solenoid, magnetic system, magnetic field induction, magnetic field energy, mechanical forces, critical current, magnetic interaction force, inductance, magnetic field distribution

**Fig. 1.** Self-supporting coil of the solenoid

**Fig. 2.** Experimental installation for solenoid testing

**Fig. 3.** SMS of three solenoids

**Fig. 4.** Distribution of the modulus of magnetic field density along the big SMS axis, current is equal to 150 A: 1 –  $Z = 25$  mm, 2 –  $Z = 75$  mm