

практике сводятся к созданию источников тока и спец. устройств (соленоидов, катушек, лайнеров и др.), в к-рых и генерируется поле при прохождении через них тока. Источники тока и соленоиды должны удовлетворять техн. требованиям, соответствующим уровню получаемых полей. Т. к.  $H \propto I$ , то в общем случае увеличение поля в соленоиде требует соответствующего роста тока  $I$ . А это в свою очередь приводит к увеличению выделения джоулева тепла в материале соленоида и росту в нём механ. напряжений (за счёт магн. составляющей Лоренца силы). Поэтому осн. проблемы на пути продвижения в область более сильных полей связаны с решением задач тепловой стойкости и механ. прочности соленоидов.

Сильные стационарные магнитные поля получают в водоохлаждаемых резистивных системах, состоящих, как правило, из 2—3 коаксиальных соленоидов разл. конструкций. Максимально достигнутое поле в рабочем зазоре 32—50 мм составляет 250 кЭ (Институт физики твёрдого тела им. М. Планка, Гренобль, Франция). Ограничение величины поля связано с проблемой охлаждения обмоток соленоидов. Мощность  $P$ , рассеиваемая в катушке, связана с величиной поля  $H_0$  в её центре соотношением

$$P = (r_0 \rho / \lambda G) H_0^2,$$

где  $r_0$  — внутр. радиус катушки,  $\rho$  — уд. сопротивление проводника,  $\lambda = V_1 / (V_1 + V_0)$  — коэф. заполнения ( $V_1$  — объём проводника,  $V_0$  — объём пространства в обмотке, незаполненный проводником),  $G$  — константа, характеризующая геометрию катушки. Чтобы получить, напр., поле  $H = 100$  кЭ в медной катушке с  $r_0 = 2$  см при комнатной темп-ре, нужен источник тока мощностью  $P \geq 2$  МВт. Для получения магн. поля в 250 кЭ использовался источник с  $P \geq 10$  МВт, а расход охлаждающей дистиллиров. воды составил  $\sim 400$  м<sup>3</sup>/ч. В качестве одной из секций резистивных соленоидов часто используется конструкция катушки, предложенная Ф. Биттером (F. Bitter, 1939). В ней металлич.

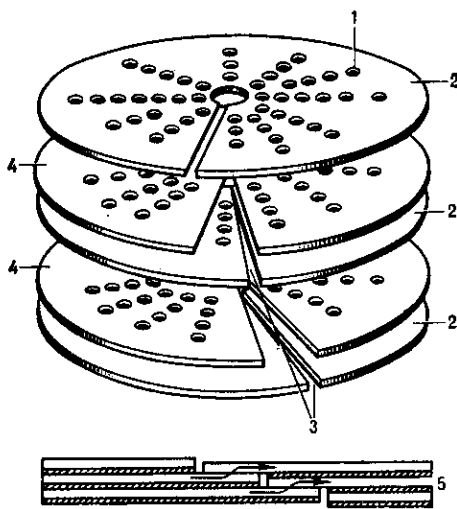


Рис. 1. Конструкция соленоида Биттера: 1 — охлаждающие отверстия; 2 — медные пластины; 3 — неизолированная поверхность контакта; 4 — изоляционные кольца; 5 — сечение катушки.

диски с разрезами, служащие витками соленоида, и изолирующие прокладки образуют при сборке двойную спираль, а охлаждающая вода прогоняется через перфорацию в дисках (рис. 1). Резистивные стационарные магниты с их системами питания и охлаждения представляют собой крупные дорогостоящие сооружения, ис-

пользующиеся во мн. науч. центрах. Дальнейшее повышение напряжённости стационарных полей в обычных резистивных системах ограничено техн. возможностями отвода больших мощностей, выделяющихся в малых объёмах. Кардинальное решение проблем тепловыделения при генерации С. м. п. даёт использование сверхпроводящих материалов. Однако макс. поля, получаемые в сверхпроводящих соленоидах, не превышают 175 кЭ, хотя критические магнитные поля ( $H_c$ ) некоторых сверхпроводников имеют большие значения (напр.,  $H_c \approx 250$  кЭ в  $Nb_3Ge$ ,  $H_c \approx 350$  кЭ в  $V_3Ga$ ). Создание сверхпроводящих магн. систем с магн. полями  $> 175$  кЭ затрудняется уменьшением с ростом поля критического тока и технол. проблемами.

Использование комбиниров. магн. систем, состоящих в одном устройстве резистивный и сверхпроводящих соленоидов, даёт перспективу получить стационарные магн. поля до 500 кЭ. В таких устройствах получено стационарное магн. поле напряжённостью 318 кЭ (Национальная магнитная лаборатория им. Ф. Бит-

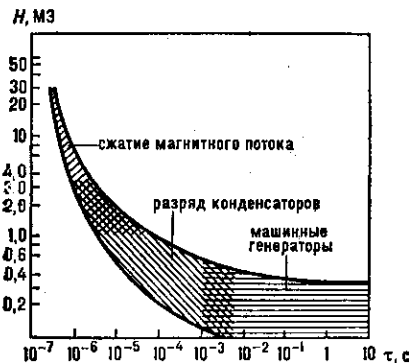


Рис. 2. Зависимость напряжённости магнитного поля от длительности импульса.

тера, США, 1987). Более высокие поля получают только в квазистационарном и импульсном режимах (рис. 2). Первые системы для получения таких сильных магн. полей были созданы П. Л. Каплицей (1924).

Квазистационарными обычно наз. сильные магн. поля с длительностью импульсов поля ( $\tau \sim 10^{-3} - 10$  с), при к-рой в соленоидах ещё слабо проявляется скин-эффект. Если напряжённость магн. поля при такой длительности импульсов не превышает 1 Мэ, его ещё можно получать в неразрушающихся системах. Для ограничения тепловыделения  $q \sim I^2 \rho t \sim H^2 \rho t$  в материале катушки, растущего с повышением поля, используют два пути: уменьшение длительности импульса поля  $\tau$  и снижение уд. сопротивления  $\rho$  материала соленоида. (Предварительное охлаждение медной обмотки соленоида до темп-ры жидкого азота [77,4 К] снижает её уд. сопротивление в 8 раз, а охлаждение до темп-ры жидкого водорода [20,4 К] — в 1000 раз.) При больших значениях поля мощность, выделяющаяся в обмотке соленоида, невозможно снять в течение импульса охлаждающей жидкостью и, чтобы не допустить опасного перегрева, нужно рассчитывать только на собств. теплоёмкость обмотки. При конструировании криогенных соленоидов необходимо учитывать, что с ростом поля и снижением темп-ры у мн. металлов (напр., у Cu) линейно с полем растёт магнетосопротивление. В качестве материала для криогенных соленоидов часто используют алюминий высокой чистоты (99,999%), т. к. его магнетосопротивление при темп-рах 20—30 К стремится к насыщению уже в полях 20—40 кЭ. Помимо снижения электросопротивления глубокое охлаждение повышает механ. прочность материала соленоида, поэтому охлаждённые катушки выдер-