

С 393 ж

Б - 262

+

3114/84



БАРТЕНЕВ В. Д., и др.

Б 1-8-84-295

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б

1-8-84-295

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 84

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

В.Д.Бартенев, В.Я.Волков, В.И.Дацков, Б.З.Житников,  
А.Г.Зельдович, Ю.А.Шишов, Г.П.Цвинева

51-8-84-235

КРИОГЕННАЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА  
УСТАНОВКИ СПИИ

.. 24 04 84

Дубна, 1983 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. Введение . . . . .	4
2. Возможные причины аварий, сопровождающихся выкипанием гелия, оценка из вероятности и опасности . . . . .	5
3. Предаварийные ситуации и развитие аварийных процессов.	
3.1. Порча изоляционного вакуума в криостате . . . . .	7
3.2. Переход магнитов в нормальное состояние . . . . .	10
3.3. Предаварийные ситуации . . . . .	10
4. Обеспечение безопасности обслуживающего персонала. . . . .	11
5. Сохранение газообразного гелия . . . . .	11
6. Предотвращения поломок оборудования . . . . .	13
7. Распределение уровня гелия в криостате при ухудшении изоляционного вакуума . . . . .	14
8. Некоторые результаты экспериментального определения скорости вскипания гелия при порче изоляционного вакуума . . . . .	15
9. Конструкция предохранительных клапанов и заглушек. . . . .	16
9.1. Требования к клапанам и условия их работы в криостате СПИНа . . . . .	16
9.2. Конструкции клапанов . . . . .	18
9.3. Предохранительные заглушки . . . . .	22
10. Расчет проходных сечений и перепадов давления в тракте аварийного сброса гелия . . . . .	24
10.1. Исходные данные и положения . . . . .	24
10.2. Гидравлические сопротивления и проходные сечения. . . . .	25
11. Обсуждение результатов расчета и экспериментов. . . . .	32
12. Технологическая схема криогенной предохранительной системы . . . . .	33
13. Выводы и предложения . . . . .	36
14. Заключение . . . . .	40
Литература . . . . .	41

### А Н Н О Т А Ц И Я

Рассмотрены причины и процессы аварийного вскипания гелия в криостате опытного сверхпроводящего синхротрона (установка СПИН). Приведены расчет и конструкция предохранительных клапанов. Представлены некоторые результаты экспериментов по аварийному вскипанию гелия при порче изоляционного вакуума воздухом и гелием. Разработана технологическая схема газовой предохранительной системы установки СПИН. Рассчитана максимальная температура обмотки магнитов СПИН. Сделаны выводы и рекомендации по вопросам аварийной защиты СПИН.

## I. Введение.

/ЛГ7/

Криостат установки СПИН (см. Приложение I) представляет собой сосуд с жидким гелием, емкость которого ( $3,3 \text{ м}^3$ ) сравнительно невелика. Однако криостат отличают большая протяженность (54 м) и малый диаметр (0,285 м) образующей сосуд трубы. Соответственно "растянут" вдоль сосуда и уровень жидкого гелия. Малы проходы для испаряющегося гелия как в сосуде над уровнем, так и на выходе. Очевидно, что при аварийном испарении гелия будет трудно или невозможно сохранить горизонтальным уровень гелия и отвести через столь узкие проходы испарившийся газ. К характеристике криостата следует добавить относительно большую поверхность гелиевого сосуда ( $\sim$  в 4 раза больше, чем у транспортного сосуда такой же емкости) и протяженность сварных швов. Конструкция криостата весьма сложна (компенсаторы, патрубки откачки ионопровода и др.), и он должен часто подвергаться разборке. Надежность криостата значительно ниже, чем у транспортного сосуда, так как у него повышенная вероятность появления гелиевых течей, которые могут испортить изоляционный вакуум и привести к аварийному вскипанию гелия.

В настоящей работе рассматриваются причины возможных аварий криостата СПИНа, процессы и опасности при протекании этих аварий и меры по обеспечению безопасной эксплуатации криостата. При этом преследуются следующие цели (перечислены по степени важности):

1. Обеспечение безопасности обслуживающего персонала.
2. Предотвращение серьезных поломок оборудования.
3. Сохранение газообразного гелия.

Для проектирования криогенной предохранительной системы СПИНа в НИКО проведены следующие работы:

1. Создана установка для исследования аварийного вскипания гелия при порче изоляционного вакуума гелием или воздухом.

2. Проведены исследования, в результате которых определены скорости выкипания гелия в опытном криостате емкостью 6 л жидкого гелия, изолированного металлизированным лавсаном в одном, или с помощью азотного экрана, в другом случае. Пересчетом по соотношению поверхностей криостатов определены скорости выкипания гелия при быстрой порче изоляционного вакуума гелием (наиболее вероятная и опасная аварийная ситуация) в криостате СПИНа.

3. Выделены предаварийные ситуации (см. раздел 3) и предложены меры по контролю гелиевых течей и профилактическому удалению жидкого гелия из криостата.

4. Рассчитаны гидравлические сопротивления в криостате, предохранительных клапанах и аварийных трубопроводах. Поскольку реальные процессы кипения и нагрева гелия в системе весьма сложны, расчеты выполнены на основе упрощенных моделей и могут рассматриваться как оценочные. В результате расчетов выбраны проходные сечения трубопроводов и клапанов (раздел 10).

5. Разработан и испытан опытный предохранительный клапан с  $D_y=50$  мм (раздел 9).

6. Проработаны два варианта предохранительной системы (разделы 10, 11, 12).

Проведенные работы показали, что значительные трудности по сохранению криостата СПИНа и гелия вызваны отсутствием азотного экрана и малыми сечениями труб аварийного сброса.

## 2. Возможные причины аварий, сопровождающихся выкипанием гелия, оценка их вероятности и опасности

Возможны следующие причины аварий или аварийных ситуаций:

I. Переход магнитов в нормальное состояние с выделением опасной в них энергии в криостате.

2. Порча вакуума в ионопроводе воздухом или гелием.

3. Порча изоляционного вакуума воздухом.

4. Порча изоляционного вакуума гелием.

Вероятность причины по п.1 достаточно велика, но существенной опасности в этом случае нет, так как запасенная энергия магнитов относительно мала и предусмотрена автоматическая эвакуация энергии на внешнюю нагрузку.

Вероятность причин по п.2 также велика, особенно в период наладочных пусков установки. Однако после проверки "на тепле" прочности и плотности ионопровода появление больших течей маловероятно. Малые воздушные течи не приведут к существенному изменению теплового режима, поэтому как причину аварии их не рассматриваем. Гелиевые течи опасны, если вакуумные насосы не смогут поддерживать давление в ионопроводе хотя бы на уровне  $10^{-4}$  мм.рт.ст.

Вероятность причины по п.3 велика, но также ожидаются в основном мелкие воздушные течи. Порча вакуума в этом случае может рассматриваться как локальная, в целом изоляционный вакуум сохранится, и работа СПИНа может быть продолжена. Более крупные течи увеличат тепловую нагрузку на рефрижератор. Опасны поломки, вызванные небрежностью обслуживающего персонала, например, при затягивании уплотнений, при работе на токовводах.

Причина по п.4, на наш взгляд, может быть наиболее распространенной и наиболее опасной. Появление маленьких отверстий представляется вполне вероятным, а существенная порча вакуума не зависит от размера отверстия и является в отсутствие насосов для откачки гелия лишь вопросом времени. Поэтому в данной работе наибольшее внимание уделено процессам при порче изоляционного вакуума гелием и мерам защиты при этой аварии.

### 3. Предаварийные ситуации и развитие аварийных процессов.

#### 3.1. Порча изоляционного вакуума в криостате.

Изоляционный вакуум может быть испорчен гелием или воздухом. Наиболее вероятные места появления течей — это сварные, паяные и разъемные соединения. Течи также могут возникнуть в тонкостенных обечайках и сильфонах. Необходима тщательная проверка в рабочих условиях надежности соединения керамических изоляторов с металлическими патрубками.

При проникновении гелия более или менее быстро ухудшается изоляционный вакуум и увеличивается теплоприток к жидкому гелию за счет теплопроводности и конвекции газа в изоляционном пространстве.

В случае проникновения воздуха основной теплоприток получается за счет его конденсации и вымерзания. Давление в изоляционном пространстве даже при значительных натеканиях может существенно не измениться, и теплоприток остаточными газами не возрастает.

Испаряющийся из криостата гелий направляют в холодный обратный поток рефрижератора и в токовводы. Усиленное испарение гелия приведет к повышению давления в гелиевом сосуде и открытию предохранительных клапанов. В результате резко увеличится расход газа, текущего вдоль поверхности жидкого гелия к выходам, и перепад давлений между выходом и наиболее удаленной от него точкой сосуда. Под действием этой разницы давлений уровень гелия отклонится от горизонтального и, при некотором критическом теплопритоке, жидкий гелий начнет загоразивать часть сечения выходящего потока газа. Затем начнется унос жидкости в теплый обратный поток (см. раздел 7 и /Л/) и интенсивное ее испарение. Необходимость проталкивать через



трубопровод большое количество газа может привести к чрезмерному повышению давления в сосуде. Давление и скорость его нарастания существенно нелинейным образом зависят от площади отверстия, через которое в изоляционное пространство натекает воздух или гелий. Результаты исследования этой зависимости обсуждаются в разделах 8 и 10.

Максимальное давление в криостате при аварийной ситуации принято равным 0,7 ати, чтобы криостат не считался сосудом, работающим под давлением. Как показано в разделе 10, возможны ситуации, когда пропускная способность 4-х клапанов  $d_y = 50$  мм (см. разделы 9, 10 и 13) недостаточна и должны быть открыты предохранительные клапаны или заглушки с большими проходами.

Рассмотрим процессы, связанные с натеканием воздуха в изоляционное пространство криостата. Пропускная способность отверстия при вязкостном течении воздуха с температурой  $20^{\circ}\text{C}$  и отношении давлений  $p_2/p_1 \leq 0,1$  (с. 339, Л2) (критическое отношение давлений  $p_2/p_1 = 0,525$ )

$$U_v \approx 20 \cdot A, \quad \text{л} \cdot \text{с}^{-1},$$

где  $A$  - площадь отверстия,  $\text{см}^2$ .

Заметим, что в результате полной конденсации воздуха на поверхности гелиевого сосуда в нашем случае  $p_2 \approx 0$  и, следовательно,  $p_2/p_1 \approx 0$  ( $p_1 = 1$  ати).

Плотность воздуха при  $20^{\circ}\text{C}$   $\rho_v \approx 1,2 \cdot 10^{-3}$   $\text{кг} \cdot \text{л}^{-1}$ .

Массовый расход

$$G_v = U_v \rho_v = 20 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} A = 0,024 A \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Теплота испарения воздуха при температурах кипения

$$\tau_v = 49 \text{ ккал/кг, гелия} - \quad \tau_r = 4,88 \text{ ккал/кг (табл. 4-81, Л3)}.$$

Количество тепла, притекающее с конденсирующимся воздухом к гелию,

$$Q = G_b \tau_b = G_r \tau_r, \text{ ккал.с}^{-1}$$

Отсюда количество испаряющегося гелия

$$G_r = \frac{G_b \tau_b}{\tau_r} \approx 0,24 \text{ А кг.с}^{-1}$$

Для закачки гелия на установке КГУ-1600/4,5 имеется 3 компрессора производительностью  $1200 \text{ нм}^3 \cdot \text{час}^{-1} \approx 0,06 \text{ кг.с}^{-1}$  каждый.

Если пренебречь испарением гелия из установки и трубопроводов, которое в обычном режиме составляет  $\sim 100 \text{ нм}^3/\text{час}$ , то компрессора будут справляться с закачкой гелия при натекании воздуха через отверстие

$$A = \frac{3 \cdot 0,06}{0,24} = 0,75 \text{ см}^2 \quad (d_y = 0,98 \text{ см}).$$

Время испарения всего гелия, находящегося в криостате, (1700 л - 203 кг при рабочей температуре 4,5К)

$$\Delta t = \frac{203}{0,24 \text{ А}} = \frac{846}{\text{А}}, \text{ с.}$$

При  $A = 0,75 \text{ см}^2$ ,  $\Delta t = 1126 \approx 19 \text{ мин.}$

Оценки показывают, что натекание воздуха через отверстия с площадью, меньшей  $0,75 \text{ см}^2$ , создает контролируемую аварийную ситуацию, а воздушные микротечи не представляют серьезной опасности.

Порча вакуума в ионопроводе воздухом может привести к интенсивному кипению в гелиевом сосуде. Попадание газообразного гелия в ионопровод не столь опасно, так как теплообмен с окружающей средой может идти только через вертикальные трубы, соединяющие ионопровод с вакуумными насосами.

### 3.2. Переход магнитов в нормальное состояние.

Некоторая опасность может возникнуть только при отсутствии эвакуации запасенной в магнитах энергии. Суммарная энергия, запасенная в дипольных магнитах, приблизительно равна 240 кДж. Такое количество энергии способно испарить только 120 л жидкого гелия. Однако не ясно, вызовет ли быстрое испарение волну в жидком гелии и выбрасывание некоторого количества жидкости в теплый обратный поток. Во всяком случае, данная аварийная ситуация представляется менее опасной, чем ухудшение изоляционного вакуума.

### 3.3. Предаварийные ситуации.

Скорость порчи вакуума при появлении гелиевой течи зависит от размера возникшего отверстия, и время до аварийного вскипания гелия иногда может быть достаточным для профилактической эвакуации жидкого гелия из криостата СПИНа. Это мероприятие позволит избежать аварийной ситуации с большими тепловыми нагрузками (до нескольких Вт.см<sup>-2</sup>).

Для обнаружения гелиевой течи необходимы установка постоянно работающего гелиевого течеискателя (или анализатора состава остаточных газов) и вывод его сигнала на пульты управления СПИНа и КГУ. Желательно также измерять скорость падения вакуума, что позволит принимать решение по профилактическим мерам. Для замедления скорости натекания гелия полезно подключать к изоляционному пространству высоковакуумный насос для откачки гелия.

Удаление жидкого гелия может быть проведено двумя способами:

I. Передавливанием в транспортные емкости. Этот путь требует дополнительных капиталовложений и непрерывных расходов холодильной мощности для поддержания емкостей в холодном состоянии.

2. Выпариванием гелия за счет увеличившегося при порче вакуума теплопритока. Через предварительно открытые предохранительные клапаны с  $d_y = 50$  мм и теплый трубопровод обратного гелия газ поступает в компрессоры. Скорость закачки ограничивается необходимостью нагрева гелия до комнатной температуры и, если нагрев обеспечен, производительностью компрессоров. При наличии газгольдеров скорость выпаривания может быть увеличена во много раз.

#### 4. Обеспечение безопасности обслуживающего персонала.

Безопасность обслуживающего персонала обеспечивается следующими мерами:

1. Испытанием всей криогенной системы на плотность и прочность.

2. Установкой приборов для контроля изоляционного вакуума и наличия течей в криостате, а также предохранительных клапанов и заглушек.

3. Профилактическим удалением жидкого гелия из криостата.

4. Места выброса холодного газа через предохранительные заглушки должны быть ограждены.

5. Для предупреждения персонала о существенной порче изоляционного вакуума, а также о повышении давления в криостате  $> 0,7$  ати, полезно установить звуковую сигнализацию.

#### 5. Сохранение газообразного гелия.

Для аварийного сбора газообразного гелия необходимы газгольдеры большой суммарной емкости -  $1200 \text{ м}^3$  при количестве жидкого гелия в криостате  $\sim 1700$  л. Полезно было бы уменьшить эти величины, например, с помощью вытеснителей жидкого гелия. В качестве вытесняющего материала могут быть использованы: инталл, обладающий высокой термостойкостью и не имеющий пор; гранулы из полимерных

материалов, зашитые в мешочки из тканого материала; применяемые в нефтяной промышленности керамические шарики; обрезки плексигласа, алюминия и т.п. Возможно изготовление специальных деталей.

Уменьшение количества гелия в криостате уменьшит материальные потери при его аварийном выбросе в атмосферу и облегчит операции по транспортировке, хранению и ожижению гелия.

#### Выбор типа газгольдеров.

Существует два вида газгольдеров: мягкий и жесткий. Рассмотрим их преимущества и недостатки.

Стоимость мягких газгольдеров во много раз меньше, чем жестких. Давление при наполнении мягкого газгольдера не возрастает, что позволяет избежать соответствующего повышения давления в криостате.

С другой стороны, поиск течей в мягких газгольдерах затруднен. Из-за низкой хладостойкости эти газгольдеры необходимо располагать в отапливаемом помещении, где место обычно весьма ограничено, и возможно потребуются нагревать направляемый в них при аварии холодный гелий. В результате большой газопроницаемости стенок диффундирующий сквозь них воздух сильно загрязняет гелий.

Достоинствами жестких газгольдеров являются простота их эксплуатации и высокая надежность. К недостаткам относятся: высокая стоимость газгольдеров и значительные затраты на строительство фундаментов и перевозку, необходимость держать в газгольдере вакуум во время работы. Последнее требование обусловлено следующими причинами. Во-первых, постоянное наполнение газгольдеров гелием потребовало бы почти удвоенного количества гелия для пуска установки. Во-вторых, вакуумированный газгольдер вмещает во время

аварийного сброса в несколько раз больше гелия, чем наполненный. При этом следует иметь в виду, что в процессе сброса гелия давление в газгольдере вряд ли можно будет повышать до 0,2-0,3 ати, так как в криостате максимально допустимое давление равно 0,7 ати, а гидравлическое сопротивление перетеканию газа из криостата в газгольдер значительно.

Таким образом, аварийный сбор гелия требует больших капитальных и эксплуатационных затрат, и вопрос о его целесообразности должен быть решен с учетом ряда факторов. В частности, если приняты меры по уменьшению количества гелия в криостате и по профилактическому удалению гелия из криостата, значительно понижается вероятность наиболее опасных аварийных ситуаций. Следует также учесть, что большая часть неполадок выявляется в период охлаждения криостата, когда в нем нет или мало жидкого гелия. Кроме того, первые гелиевые заливки покажут степень надежности криогенных систем СПИНа.

#### 6. Предотвращение поломок оборудования.

Наибольшей опасности при резкой порче изоляционного вакуума подвергаются гелиевый сосуд и ионопровод, рассчитанные на давление 0,7 ати.

Следовательно, если с помощью подбора предохранительных клапанов удастся обеспечить  $P_{авар.} \leq 0,7$  ати, то одновременно будет обеспечена сохранность сосуда и ионопровода. И наоборот, при недостаточном сечении клапанов чрезмерное повышение давления может привести к потере устойчивости ионопровода или к изгибу стенок сосуда, разрыву сварных швов и дальнейшему развитию аварии.

## 7. Распределение уровня гелия в криостате при ухудшении изоляционного вакуума.

Важными особенностями криостата установки СПИН, с точки зрения конструирования газовой предохранительной системы, являются большая протяженность уровня гелия и малая допустимая разница уровней в различных точках периметра криостата.

Как отмечалось в разделе 3.1, поток испаряющегося гелия, идущий вдоль уровня, создает разницу давлений, которая, в свою очередь, вызывает изменение профиля уровня. Для расчета на ЭВМ этого профиля при нормальной работе криостата в НИКО разработана программа. Предложено использовать эту программу и для анализа аварийных ситуаций. Результаты расчетов показывают, что допустимая тепловая нагрузка весьма ограничена. Например, при 4-х предохранительных клапанах, находящихся на расстоянии друг от друга  $\sim 15$  м, и исходном уровне гелия 260 мм допустимая нагрузка равна  $\sim 0,015$  Вт/см<sup>2</sup>. Это означает, что при большой нагрузке и при сохранении уровня гелия вблизи клапана, уровень между клапанами упадет ниже допустимой величины  $\sim 220$  мм и обнажатся магниты, либо произойдет выброс жидкости в клапан. Увеличение числа клапанов вдвое увеличивает допустимую нагрузку примерно в 3 раза. Как показано в разделе 8, аварийные тепловые нагрузки во много раз превосходят названные выше. Следовательно, значительное изменение уровня произойдет в первой стадии аварийной порчи вакуума. Также не исключена возможность образования волн в жидком гелии, особенно при резком открытии предохранительных клапанов и заглушек. Однако программа рассматривает только стационарные процессы.

8. Некоторые результаты экспериментального определения скорости вскипания гелия при порче изоляционного вакуума.

Расчет скорости испарения гелия при аварийной порче изоляционного вакуума в криостате СПИНа чрезвычайно сложен, так как в течение этого процесса сильно изменяются многие важные параметры (давление и температура газа в изоляционном пространстве, скорость натекания газа в это пространство, температура многослойной изоляции и поверхности стенки гелиевого сосуда и др.). Для увеличения надежности газовой предохранительной системы такой крупной и уникальной криогенной установки, как СПИН, было решено провести экспериментальные исследования процессов аварийного вскипания гелия в небольшом вертикальном криостате.

Внутренний диаметр криостата равен 200 мм, толщина стенки гелиевого сосуда 2 мм. Обычно в криостат заливали 6 л гелия. Криостат представляет собой модель криостата установки СПИН: по соотношению объемов жидкого гелия  $1700 \text{ л} / 6 \text{ л} \approx 283$ , по соотношению поверхности жидкого гелия, через которую идет аварийный теплоприток,  $48,3 \text{ м}^3 / 0,133 \text{ м}^2 = 363$ . То есть, масштаб модели примерно равен 1:300.

В настоящее время часть экспериментов проведена и получены основные величины, позволяющие принять решения по конструкции предохранительной системы установки СПИН.

При изоляции опытного криостата с помощью азотного экрана и резкой порче изоляционного вакуума холодным гелием удельное весовое количество испаряющегося гелия равно  $0,135 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ \*. В варианте с суперизоляцией (азотный экран отсутствует) соответствующая величина составляет  $1,84 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ \*. Если допустить, что температура кипения гелия в опытном криостате остается постоянной

\* Примечание: Измерена скорость падения уровня гелия и принято, что давление в криостате не растет, а температура жидкости остается равной 4,2 К, тогда  $\rho = 125 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .



и равной  $\sim 4,2\text{К}$  в течение всего процесса кипения, то можно принять величину теплоты испарения равной  $20,9 \text{ кДж.кг}^{-1} / \text{лЗ}/$ . Тогда удельные теплопритоки составят в первом варианте  $0,28 \text{ Вт.см}^{-2}$  и во втором  $3,9 \text{ Вт.см}^{-2}$ .

## 9. Предохранительные клапаны.

### 9.1. Требования к клапанам и условия их работы в криостате СПИНа.

Устанавливаемые на гелиевом сосуде СПИНа клапаны должны отвечать следующим требованиям:

1. Герметичность в закрытом состоянии.

2. Полноподъемность.

3. Быстродействие (порядка десятых долей секунды).

4. Минимальное гидравлическое сопротивление.

5. Надежность (обязательное открытие при заданном давлении и отсутствие ложных срабатываний).

6. Возможность повторного закрытия при кратковременном срабатывании с прохождением холодного гелия. Закрытие должно быть обеспечено при давлении в сосуде  $0,2-0,3$  ати.

7. Простота конструкции и технологии.

8. Двухпозиционность (находится либо в закрытом, либо полностью открытом состоянии) и отсутствие существенных вибраций при открытом состоянии.

Условия работы клапанов на установке СПИН следующие:

Допустимое давление в криостате весьма невелико и составляет  $0,7$  ати, в то время как рабочее давление равно  $0,2-0,3$  ати. При быстрой порче изоляционного вакуума происходит бурное выкипание гелия. Например, при изоляции сосуда 50-ю слоями алюминизированной

лавсановой пленки время полного выкипания составляет всего  $\sim 2,4$  с. Неправильная работа операторов может вызвать кратковременное повышение давления в криостате, что не должно приводить к долгосрочной потере рабочих условий.

Рассмотрим более подробно требования к клапанам, исходя из описанных условий их работы.

Герметичность затвора обычно обеспечивают твердыми или мягкими прокладками. Оба варианта обладают недостатками. Для уплотнения твердых прокладок необходимы большие усилия, которые могут быть обеспечены вспомогательными управляющими устройствами /Л4/. Однако такие устройства сложны, не вполне надежны, <sup>а иногда</sup> снижают быстродействие клапана. Мягкие, например, резиновые прокладки при кратковременном срабатывании клапана твердеют и в дальнейшем, после закрытия клапана, не уплотняются, так как проток холодного гелия держит их в замороженном состоянии. Приходится ставить последовательно с клапаном вентиль, что противоречит правилам Госгортехнадзора

Полноподъемность в клапанах достигается различными способами /Л5/. Часто используют кинетическую энергию газа. Однако в нашем случае перепады давлений и скорости газа в клапане сравнительно невелики и недостаточны для эффективного действия на золотник с диском. В криогенных устройствах наиболее распространены клапаны с подачей среды под золотник. В этом случае трудно обеспечить гарантированную полноподъемность с помощью поршня или сильфона, установленного за золотником, где давление может оказаться недостаточным.

Таким образом, известные клапаны не в полной мере отвечают всем перечисленным требованиям. Нами разработано и испытано два варианта клапанов с  $d_y = 50$  мм, описания которых представлены ниже. Второй вариант, как более надежный, принят для установки на криостате СПИНа.

## 9.2. Конструкции клапанов.

### Предохранительный клапан с удерживанием золотника с помощью вакуумной откачки.

Конструкция клапана показана на рис. I. В корпусе 5 установлены две концентричные резиновые прокладки 4, пространство между которыми откачано через отверстие 7. В результате золотник прижат к седлу с силой, которая регулируется величиной вакуума. Для предварительного поджатия золотника служит герметичный сильфон 2, также соединенный с форвакуумным насосом через отверстие 10.

Предохранительное устройство готовится к работе следующим образом. Через отверстие 10 сильфон 2 откачивают, и он, сжимаясь, своим днищем прижимает шток с золотником 8 к седлу. При этом скорость откачки намного превышает скорость натекания газа через отверстие в корпусе, соединяющее пространства над золотником и под сильфоном.

Коснувшись уплотнительных прокладок 4, золотник присасывается к ним благодаря тому, что пространство между ними также откачивают через отверстие 7. После закрытия золотником входного отверстия откачку полости под сильфоном прекращают. Газ из внутренней полости корпуса 3 постепенно перетекает в полость сильфона. При этом сильфон разжимается и возвращается в исходное положение. Между его днищем и штоком золотника образуется зазор, обеспечивающий при срабатывании клапана беспрепятственное перемещение золотника.

Срабатывает клапан следующим образом. При превышении установленного давления  $P$  в криостате, золотнику достаточно немного оторваться от прокладок 4, как образуется кольцевая щель и в межпрокладочном пространстве мгновенно исчезает вакуум. В дальнейшем, из-за того, что никакого противодействия золотник не встречает, он отбрасывается до соприкосновения с амортизатором 9, освобождая проход для выхода газа из емкости.

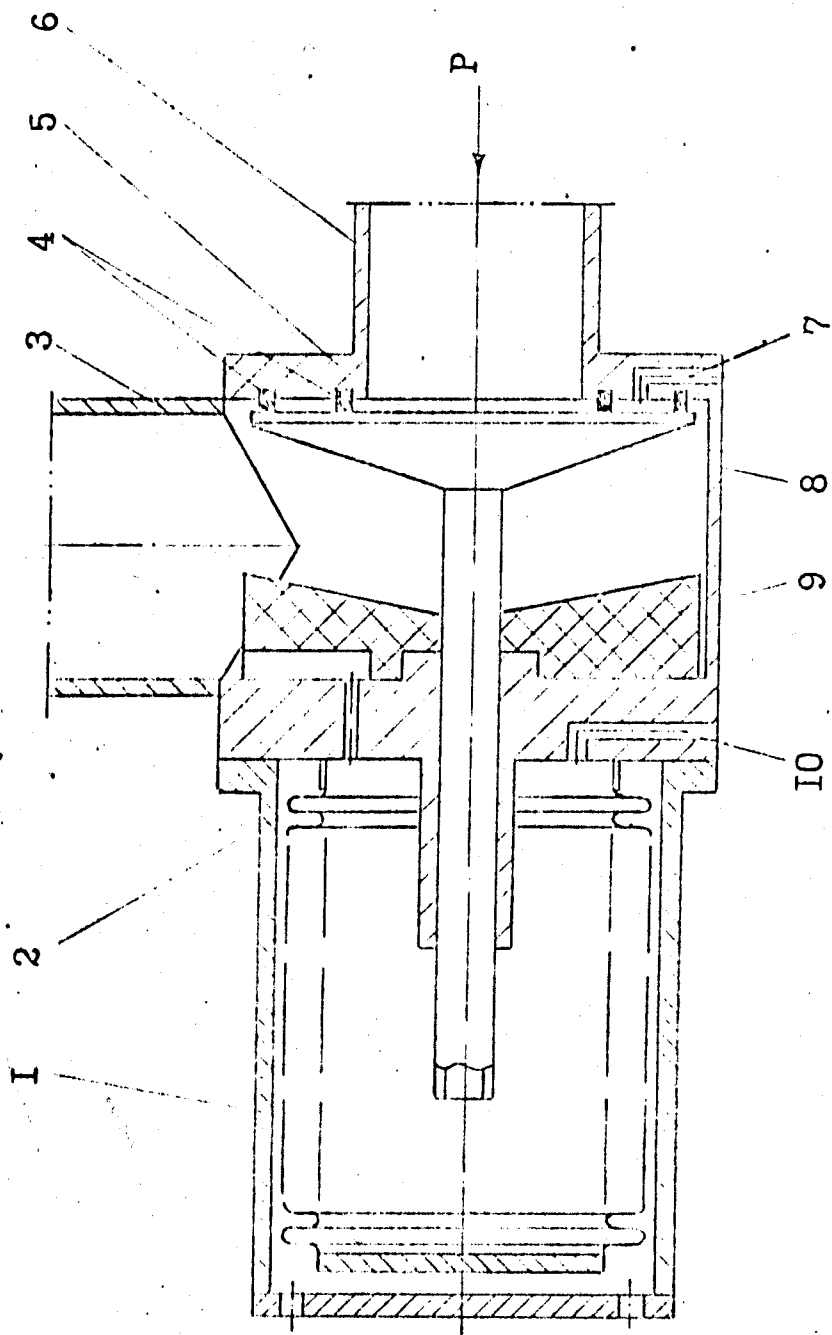


Рис. I. Вариант предохранительного клапана с удерживанием золотника с помощью вакуумной откачки. 1-стакан, 2-сильфон, 3-патрубок обратного потока, 4-резиновые прокладки, 5-корпус, 6-патрубок криостата, 7-форвакуумная откачка или отогрев гелем, 8-золотник, 9-демпфер, 10-форвакуумная откачка.

Наличие двух прокладок 4 позволяет вести их отогрев теплым газом (через отверстие 7), что обеспечивает быстрое возвращение клапана в рабочее состояние.

К недостаткам клапана можно отнести возможность самопроизвольного открытия при порче вакуума в межпрокладочном пространстве. Отсюда велики требования к герметичности уплотнения прокладок.

#### Рабочий вариант клапана.

Второй вариант клапана (рис.2) предполагается использовать в предаварийных ситуациях на установке СПИН, где будут установлены 4 таких клапана с  $d_y = 50$  мм (рис.5). Клапан отличается тем, что среда подается на золотник 3, который удерживается в закрытом состоянии подачей давления во внутреннюю полость сильфона 2. Эффективная площадь сильфона значительно больше площади золотника. Поэтому клапан открывается, когда возникшее от действия давления в криостате усилие, обусловленное этой разницей площадей, превышает усилие от удерживающего давления. Клапан является полноподъемным, так как после подъема золотника над седлом 4 исчезает сила, прижимающая золотник к седлу.

Как и в предыдущем варианте в клапане имеются две концентричные уплотнительные дорожки, образованные на резиновой уплотнительной прокладке зубцами золотника. В процессе эксплуатации может произойти срабатывание одного из 4-х клапанов, например, в результате случайного сброса удерживающего давления. При этом холодный газ из гелиевого сосуда устремится через клапан в обратный поток и резиновое уплотнение замерзнет. В обычных клапанах последующая подача даже увеличенного удерживающего давления не приводит к уплотнению и отогреву клапана. Холодный гелий под давлением 0,2-0,3 ати проходит через затвердевшую прокладку и не дает ей

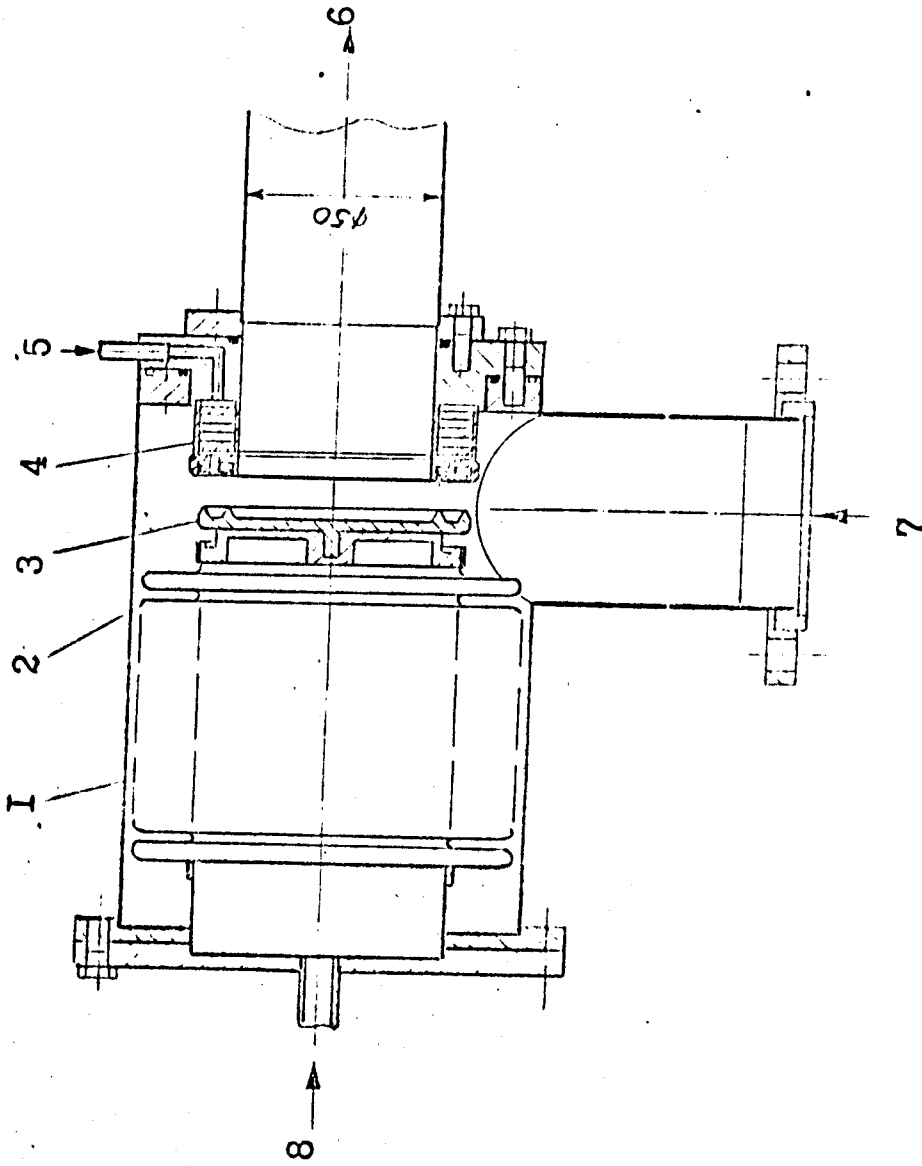


Рис. 2. Предохранительный клапан на Ду=50мм.  
1-корпус, 2-сильфон, 3-золотник, 4-седло с резиновой прокладкой и радиатором, 5-обогрев седла, 6-патрубок обратного потока, 7-патрубок крностата, 8-опорное давление.

отогреваться. Для отогрева описываемого клапана подается теплый гелий из линии сжатого гелия через отверстие 5. Причем давление в этом пространстве должно быть равно давлению в гелиевом сосуде. Тогда гелий перестает вытекать из сосуда, а теплый гелий протекает через щель между золотником и внешней прокладкой и направляется в обратный поток. Эта прокладка отогревается быстро. Вторая прокладка отогревается вместе с корпусом клапана. Для ускорения этого процесса в седле 4 имеются теплообменник и специальное отверстие в корпусе седла, через которое обеспечивается достаточный проток теплого гелия.

Опытный образец клапана успешно испытан на стенде с продувкой жидким азотом.

### 9.3. Предохранительные заглушки.

Для варианта изоляции криостата СПИНа с помощью лавсановой пленки аварийный сброс гелия должен происходить через 4 трубы внутренним диаметром 0,25 м. Выходы из труб могут быть закрыты предохранительными клапанами, мембранами или заглушками 4 (рис.3). Последняя открывается при разрыве болтов 3 в месте проточки. Рассмотрим преимущества заглушек.

Конструкция узла заглушки существенно проще, чем клапана или мембраны. Гидравлическое сопротивление узла заглушки меньше. Клапан может быть случайно открыт, например, при сбросе удерживающего давления. Мембрана может сломаться в результате многократных прогибов. Заглушка представляется более надежным устройством.

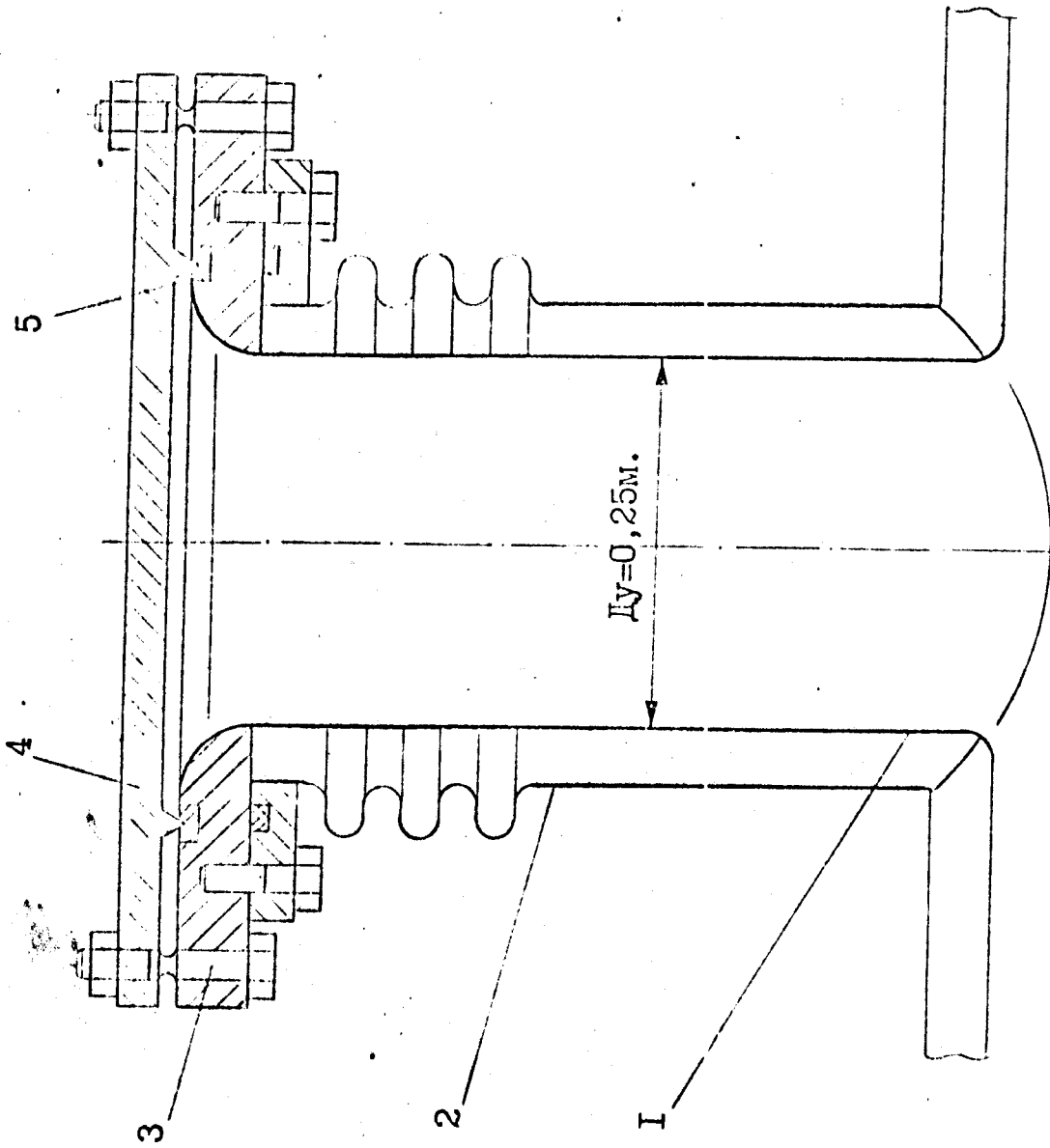


Рис. 3. Узел предохранительной заглушки. 1-труба аварийного сброса с фланцем, 2-труба вакуумного кожуха с фланцем, 3-болт, 4-заглушка, 5-уплотнительные прокладки.



## 10. Расчет проходных сечений и перепадов давления в тракте аварийного сброса гелия.

### 10.1. Исходные данные и положения.

Ниже приведены расчеты для наиболее тяжелого случая аварийной порчи изоляционного вакуума - мгновенное наполнение изоляционного пространства гелием. При этом рассмотрены два варианта изоляции гелиевого сосуда - суперизоляцией и с помощью азотного экрана.

В разделе 7 показано, что отвод пара, образующегося в криостате в результате аварийной ситуации, весьма затруднен. В результате образующегося по длине криостата перепада давлений (между клапаном и наиболее удаленной от него точкой криостата) профиль уровня жидкого гелия изменяется, и даже при умеренных теплопритоках жидкость устремляется в клапан. Кроме того, из опытов в вертикальном криостате (см. раздел 8) известно, что при бурном кипении уровень жидкого гелия повышается. Таким образом, газовое пространство в гелиевом сосуда (25 мм над уровнем) будет заполнено парожидкостной смесью. Поскольку определить паросодержание смеси весьма сложно, то для дальнейших расчетов принята следующая упрощенная модель истечения.

Все пространство гелиевого сосуда заполнено жидким гелием. В наиболее удаленной от клапана точке генерируется пар в количестве, обусловленном теплопритоком ко всему участку между этой точкой и клапаном, и этот газовый поршень выдавливает жидкость. Причем, чтобы давление в газовом пространстве не повышалось более 0,7 ати, объем выдавливаемой жидкости должен быть равен объему генерируемого при этом давлении пара. Процесс считается стационарным, объем газового пузыря значительно меньше объема жидкости.

При расчете местных гидравлических сопротивлений течению жидкого гелия в сосуде принимаем условие, что магниты расположены соосно с гелиевым сосудом.

Не учитываем повышение давления при попадании жидкости на теплые части аварийных трубопроводов и клапанов.

### 10.2. Гидравлические сопротивления и проходные сечения.

#### а) Вариант изоляции криостата с помощью азотного экрана.

Удельное весовое количество гелия, испаряемого в опытном криостате при резкой порче изоляционного вакуума холодным гелием, равно  $0,135 \text{ кг.с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  (см. раздел 8). Внутренняя поверхность гелиевого сосуда установки СПИН

$$S = \pi d \ell = 3,14 \cdot 0,285 \cdot 54 = 48,3 \text{ м}^2,$$

где  $d$  - внутренний диаметр сосуда,  $\ell$  - длина сосуда по осевой линии (см. Приложение № I).

Весовое испарение в СПИНе

$$G_{\text{исп.}} = 0,135 \cdot 48,3 = 6,52 \text{ кг.с}^{-1}.$$

Принимаем, что на гелиевом сосуде установлен I предохранительный клапан, к которому жидкий гелий идет по двум ветвям сосуда (рис.4) с такой же скоростью, с какой шел бы испарившийся газ. Из уравнения неразрывности скорость жидкого гелия в криостате

$$v_{\text{не}} = \frac{G_{\text{исп.}}}{\rho_r \cdot 2F},$$

где  $\rho_r$  - плотность газа,  $F = \frac{\pi d^2}{4}$  - полная площадь сечения гелиевого сосуда. При давлении в криостате 0,7 ати равновесная температура кипения  $\sim 4,8\text{К}$  и  $\rho_r = 32 \text{ кг.м}^{-3}$  (по TS'-диаграмме).

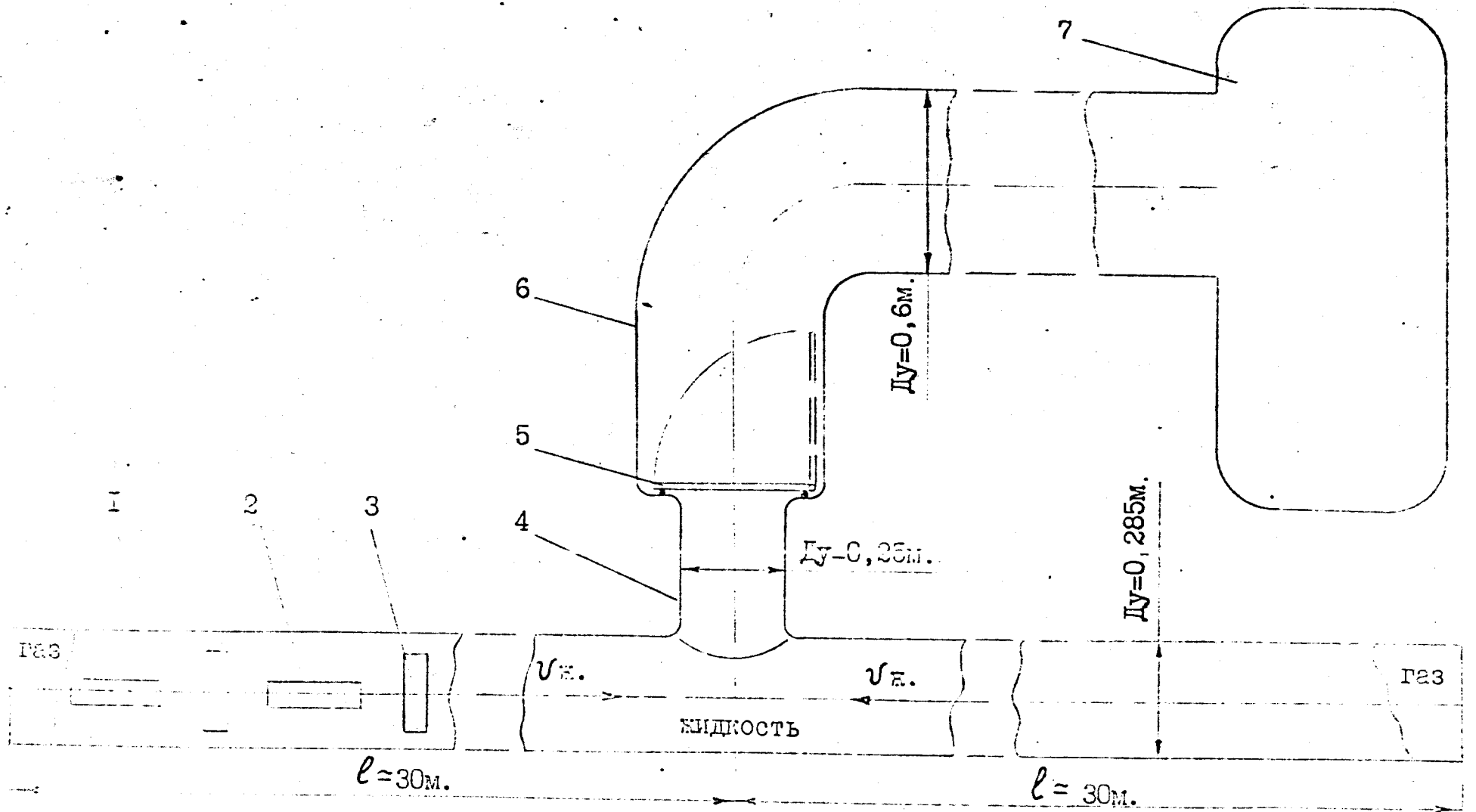


Рис. 4. Схема криостата с I-м предохранительным клапаном. 1-желтый сосуд, 2-дипольный магнит, 3-квадрупольный магнит, 4-стойка, 5-предохранительный клапан-заглушка, 6-теплый трубопровод, 7-газгольдер.

$$v_{ге} = \frac{6,52 \cdot 4}{32 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,285^2} \approx 1,6 \text{ м.с}^{-1}$$

Критерий Рейнольдса  $Re = \frac{v_{ге} d}{\nu_{ге}}$ ,

где  $\nu_{ге} = \frac{\eta_{ге}}{\rho_{ге}}$  - кинематическая вязкость жидкого гелия,  $\eta_{ге}$  - коэффициент динамической вязкости. Приняв существенно неравновесный характер кипения гелия, считаем, что температура основной его массы остается равной рабочей и составляет  $\sim 4,5\text{К}$ . По табл. 4-41 /ЛЗ/ экстраполяцией находим

$$\eta_{ге} \approx 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ П.с.м}^{-2} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ кг.м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

$$\rho_{ге} \approx 120 \text{ кг.м}^{-3} \text{ (по } T S \text{ -диаграмме).}$$

$$Re = \frac{1,6 \cdot 0,285 \cdot 120}{2,9 \cdot 10^{-6}} \approx 1,9 \cdot 10^7 \gg 2300,$$

следовательно, режим течения - турбулентный.

Потеря давления на трение

$$\Delta P_{тр.} = \lambda \frac{e}{d} \frac{\rho_{ге} v_{ге}^2}{2},$$

где  $e = 30 \text{ м}$  - половина длины криостата, коэффициент трения  $\lambda$  при  $Re = 10^4 - 10^8$  определяется по формуле Никурадзе (с.243 /3/)

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,273} \approx 0,0055.$$

$$\Delta P_{тр.} = 0,0055 \cdot \frac{30}{0,285} \cdot \frac{120 \cdot 1,6^2}{2} = 88,9 \text{ Н.м}^{-2} = 8,8 \cdot 10^{-4} \text{ атм}$$

Потеря давления на местные сопротивления (рис.4)

$$\Delta P_{м.с.} = \sum \zeta \frac{\rho_{ге} v_{ге}^2}{2}.$$

Коэффициенты местного сопротивления при внезапном сужении сечения потока находится по формуле (табл.6 /5/)

$$\zeta = 0,5 \cdot (1 - f_1/f_2),$$

при внезапном расширении

$$\zeta = (1 - f_1/f_2)^2.$$

Поперечные сечения ложементов  $\approx 0,01 \text{ м}^2$ , квадруполь  $\approx 0,04 \text{ м}^2$ , диполь  $0,02 \text{ м}^2$ . Считая, что ложементы расположены по всей длине криостата, находим для отрезка длины, приходящейся на I диполь и I квадруполь суммарное  $\zeta = 1,3$ . На половине длины криостата находится 12 периодов с 2-мя дипольными и 2-мя квадрупольными магнитами в каждом. Следовательно,

$$\sum \zeta = 12 \cdot 2 \cdot 1,3 = 31,2,$$
$$\Delta P_{\text{м.с.}} = 31,2 \cdot \frac{120 \cdot 1,6^2}{2} = 4792 \text{ Н.м}^{-2} = 0,047 \text{ атм.}$$

Местные сопротивления в стояке и клапане-заглушке складываются из поворота потока при входе в стояк на  $90^\circ$  ( $\zeta = 1,3$ , табл.6 /5/), внезапного сужения ( $\zeta = 0,31$ ) и внезапного расширения ( $\zeta = 0,69$ ) при выходе из стояка в теплый трубопровод.

$$\sum \zeta = 2,3.$$

Приняв диаметры проходных сечений стояка и клапана равными 0,25 м, получим скорость жидкого гелия

$$v_{\text{ге}} = \frac{G_{\text{исп.}}}{\rho_r \cdot F_{\text{кл.}}} = \frac{6,25 \cdot 4}{32 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2} = 4,1 \text{ м.с.}^{-1}.$$

$$\Delta P_{\text{м.с.}} = 2,3 \cdot \frac{120 \cdot 4,1^2}{2} \approx 2320 \text{ Н.м}^{-2} = 0,023 \text{ атм.},$$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{тр.кр.}} + \Delta P_{\text{м.с.кр.}} + \Delta P_{\text{м.с.}} \approx 0,0009 + 0,047 + 0,023 = 0,071 \text{ атм.}$$

Теплый трубопровод от клапана к газгольдеру.

С помощью предварительных расчетов выбраны  $d_y = 0,6$  м и длина  $l = 100$  м.

Предположим, что выходящий из клапана гелий мгновенно нагревается до  $0^\circ\text{C}$  и находится в трубопроводе при атмосферном давлении, тогда  $\rho_{т.г.} = 0,178 \text{ кг.м}^{-3}$ .

Весовой расход

$$G = G_{исп.} \frac{\rho_{не}}{\rho_{т.г.}} = 6,52 \cdot \frac{120}{32} \approx 24,5 \text{ кг.с}^{-1}.$$

Примем  $G \approx 25 \text{ кг.с}^{-1}$ .

$$v_{т.г.} = \frac{G}{\rho_{т.г.} \cdot F} = \frac{25 \cdot 4}{0,178 \cdot 3,14 \cdot 0,6^2} \approx 497 \text{ м.с}^{-1} < 971 \text{ м.с}^{-1} -$$

скорости звука при 273К.

Коэффициент динамической вязкости  $\eta = 192 \cdot 10^{-7} \text{ кг.м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  (табл.4-36 /II/).

$$Re = \frac{497 \cdot 0,6 \cdot 0,178}{192 \cdot 10^{-7}} = 2,76 \cdot 10^5 \gg 2300 - \text{турбулентный режим.}$$

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot (2,76 \cdot 10^5)^{-0,271} \approx 0,0071.$$

$$\Delta P_{тр.} = 0,0071 \cdot \frac{100}{0,6} \cdot \frac{0,178 \cdot 497^2}{2} = 26014 \text{ Н.м}^{-2} = 0,26 \text{ атм.}$$

Местные сопротивления складываются из примерно 5-ти поворотов на  $90^\circ$  в сварных коленах (по табл.6 /5/ в колене  $\xi = 0,5-0,6$ ) и выхода в атмосферу ( $\xi = 1,0$ ). Примем  $\sum \xi = 4,0$ .

$$\Delta P_{м.с.} = 4,0 \cdot \frac{0,178 \cdot 497^2}{2} = 87935 \text{ Н.м}^{-2} = 0,87 \text{ атм,}$$

что неприемлемо. Необходимо применять плавные повороты.

При  $R/d = 3$  ( $R$  - радиус поворота,  $d$  - диаметр трубы)  $\xi = 0,12$ ,  
 $\sum \xi = 1,6$ ,  $\Delta p_{\text{м.с.}} \approx 0,35$  атм.

$$\Delta p_{\Sigma} = 0,26 + 0,35 = 0,61 \text{ атм.}$$

Вместе с сопротивлением криостата и стояка

$$\Delta p = 0,071 + 0,61 = 0,68 \text{ атм,}$$

то есть суммарное сопротивление всего тракта не превышает допустимой величины в 0,7 ати.

Повидимому, реальное сопротивление существенно меньше, поскольку газ не может мгновенно нагреться до  $0^{\circ}\text{C}$ , как это было принято для расчета. Однако по проведенным оценкам видно, что коэффициент теплоотдачи от стенки к газу весьма велик. Необходим более детальный расчет течения газа с нагревом, что является очень сложной задачей, или экспериментальное изучение этого вопроса.

б) Вариант с суперизоляцией криостата (азотный экран отсутствует).

Удельное весовое количество гелия, испаряемого в опытном криостате при резкой порче изоляционного вакуума холодным гелием, равно  $1,84 \text{ кг.с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  (см. раздел 8). Весовое испарение в СПИНе

$$G_{\text{исп.}} = 1,84 \cdot 48,3 = 88,9 \text{ кг.с}^{-1}.$$

Для дальнейших расчетов примем  $G_{\text{исп.}} = 90 \text{ кг.с}^{-1}$ .

При количестве жидкого гелия в криостате  $\sim 1700$  л его вес равен  $G = 1700 \cdot 0,120 = 204 \text{ кг}$ . Время его полного испарения

$$\Delta t = G/G_{\text{исп.}} \approx 2,3 \text{ с.}$$

С помощью предварительных расчетов выбраны количество труб аварийного сброса (4 шт.) и диаметр их проходного сечения (0,25 м).

Трубы снабжены предохранительными заглушками, которые полностью

открывают выход гелию в атмосферу. Аварийные трубы расположены на примерно равном расстоянии друг от друга (примем 15 м). Также считаем, что жидкий гелий идет по криостату к заглушкам с такой же скоростью, с какой бы шел газ, испарившийся на половине расстояния между заглушками:

$$v_{\text{гел.}} = \frac{G_{\text{исп.}}}{\rho_{\text{г.}} \cdot 8F} = \frac{90 \cdot 4}{32 \cdot 8 \cdot 3,14 \cdot 0,285^2} = 5,5 \text{ м.с}^{-1}.$$

$$Re = \frac{5,5 \cdot 0,285 \cdot 120}{2,9 \cdot 10^{-6}} = 6,5 \cdot 10^7 \gg 2300 \text{ (турбулентный режим)}$$

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot (6,5 \cdot 10^7)^{-0,273} = 0,0048.$$

$$\Delta p_{\text{тр.}} = 0,0048 \frac{7,5}{0,285} \cdot \frac{120 \cdot 5,5^2}{2} = 229 \text{ Н.м}^{-2} \simeq 0,002 \text{ атм.}$$

Местные сопротивления 1/8 части криостата (6 диполей и 6 квадруполей)

$$\sum z = 6 \cdot 1,3 = 7,8,$$
$$\Delta p_{\text{м.с.}} = 7,8 \frac{120 \cdot 5,5^2}{2} = 14157 \text{ Н.м}^{-2} = 0,14 \text{ атм.}$$

В расчете не учтены инерция жидкости, местные сопротивления сильфонов между периодами (часть криостата с 2-мя дипольными и 2-мя квадрупольными магнитами), фланцевых соединений ионопровода, патрубков откачки и многое другое. Но за счет смещения оси ионопровода вниз от оси криостата гидравлическое сопротивление должно существенно уменьшиться. Поскольку сделать точный расчет трудно, то полезно измерить сопротивление, пропуская газ через собранный криостат).

Коэффициенты  $\sum z$  в трубе аварийного сброса (стояк) складываются из поворота потока на  $90^\circ$  при входе в стояк ( $z = 1,3$ ), внезапного сужения ( $z = 0,12$ ) и выхода в атмосферу ( $z = 1,0$ ).



Трением в стояке пренебрегаем ввиду его малости. Примем с запасом

$$\bar{z} = 2,5.$$

$$V_{\text{исп}} = \frac{G_{\text{исп}}}{\rho \cdot 4F} = \frac{90 \cdot 4}{32 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2} \approx 14 \text{ м.с}^{-1},$$

$$\Delta p_{\text{м.с.}} = 2,5 \frac{120 \cdot 14^2}{2} = 29400 \text{ Н.м}^{-2} = 0,29 \text{ атм.}$$

$$\Delta p = 0,002 + 0,14 + 0,29 = 0,43 \text{ атм,}$$

что вполне допустимо.

## II. Обсуждение результатов расчета и экспериментов.

Получены экспериментальные данные о процессах аварийного вскипания гелия, в том числе удельные количества испаряющегося в единицу времени гелия при различной изоляции криостата. Доказано, что возможно существенное ограничение аварийного теплопритока к криостату с помощью азотного экрана. Наблюдался значительный подъем уровня гелия при кипении. Получены количественные величины, необходимые для расчета предохранительной системы СПИНа.

Однако для более точных расчетов данный экспериментальный материал недостаточен. Не выдержан ряд условий, при которых происходит процесс кипения на СПИНе, поскольку на опытном криостате не было предохранительного клапана. Необходимо выбрать то же, что и на СПИНе, соотношение объемов жидкого и газообразного гелия и исследовать ход процессов до открытия (изохорический) и после открытия клапана.

Требуются измерения температур в гелиевом сосуде. Это позволит правильно рассчитать теплоту парообразования и, следовательно, тепловые нагрузки и определить удельную плотность жидкости. Последнее поможет разобраться, какую роль в подъеме уровня жидкости играют пузыри и какую уменьшение

удельного объема жидкости, которое сильно зависит от температуры. Другими словами, необходимо определить степень неравновесности кипения гелия в различных условиях. Кроме того, требуются данные о нагреве гелия в теплых трубах. Это, возможно, позволит уменьшить диаметр труб, ведущих к аварийному газгольдеру. Полезны были бы эксперименты с изолированными, например, пенопластом (с внутренней стороны) металлическими трубами. Отмечается большой разброс экспериментальных данных, что, повидимому, свидетельствует о неодинаковости начальных условий. Необходимо определить гидравлические сопротивления в криостате СПИНа после его сборки, продувая через него теплый гелий.

После получения перечисленных данных необходимо откорректировать приведенные выше расчеты. Требуются некоторые дополнительные расчеты. В частности, полезны оценки скорости развития процессов в предаварийный период, например, скорости изменения давления в изоляционном пространстве криостата СПИНа (от  $\sim 10^{-5}$  до  $10^{-2}$  мм рт.ст.) в зависимости от диаметра отверстия и рода газа. Полезно рассмотреть, на основе расчетов температуры обмотки дипольных магнитов при переходе их в нормальное состояние (см. Приложение 2), ситуацию в гелиевом сосуде. Неизвестно, например, не будут ли сорваны предохранительные заглушки.

## 12. Технологическая схема криогенной предохранительной системы.

Технологическая схема (рис.5) предусматривает два варианта изоляции криостата: суперизоляция и азотный экран. В первом варианте гелий сбрасывается в атмосферу через четыре предохранительные заглушки  $D_y = 250$  мм (поз.3) при давлении в криостате 0,7 ати, после того, как перестали справляться с эвакуацией гелия

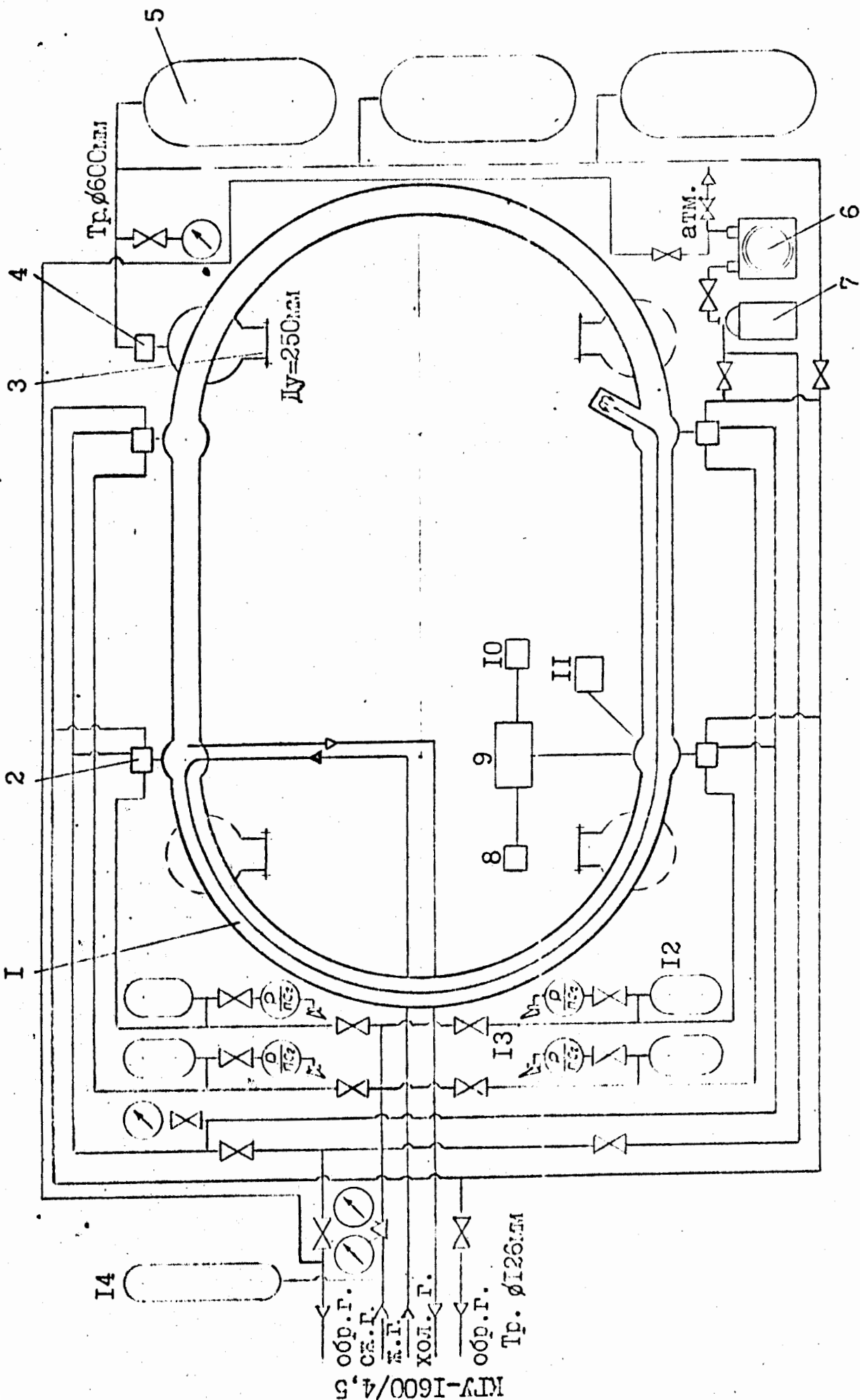


Рис. 5. Технологическая схема криогенной предохранительной системы установки СПИНА.  
 I - криостат, 2 - предохранительный клапан Ду=50мм, 3 - предохранительная заглушка, 4 - предохранительный клапан Ду=250мм, 5 - газгольдер, 6 - форвакуумный насос, 7 - азотная ловушка, 8 - выносной блок на пульте «ДУ», 9 - гелевый теочислитель, 10 - выносной блок на пульте СПИНА, 11 - датчик давления в криостате, 12 - бачок, 13 - манометры сигнализирующие, 14 - баллон 30 атм.

четыре предохранительных клапана  $D_y = 50$  мм (поз.2). Во втором варианте оставляется только одна труба аварийного сброса  $D_y = 250$  мм, на ней устанавливаются: предохранительный клапан-заглушка  $D_y = 250$  мм (поз.4), далее труба  $\varnothing 600$  мм и газгольдеры (поз.5).

Непрерывное слежение за появлением гелиевых течей ведется с помощью течеискателя 9 и сигнализаторов 8,10. Самописец II позволяет зафиксировать ход давления в криостате во время аварии.

В предаварийной ситуации жидкий гелий выдавливается через трубу жидкого гелия в цистерны, установленные рядом с рефрижератором КГУ\*. При этом выход холодного гелия из криостата должен быть перекрыт. Если в это время давление в криостатах превысит 0,5 ати, открываются клапаны 2, и часть гелия через трубу обратного потока  $\varnothing 126$  мм идет на закачку компрессорами.

Удерживающее давление клапанов 2 контролируется электроконтактными мановакууметрами 13, которые сигнализируют об отклонении давления от нормы. Питание удерживающего давления подается от баллона 14 через редуктор. Чтобы при малых утечках удерживающее давление не падало слишком быстро, к линии подсоединены бачки 12 емкостью 5 л каждый.

Прекращение потока холодного гелия через замерзшие резиновые прокладки клапана после его кратковременного срабатывания осуществляется подачей теплого сжатого гелия по специальной линии. Этот же гелий, протекая через теплообменник, встроенный в седле клапана, отогревает его.

Удаление воздуха из системы ведется с помощью форвакуумного насоса 6 через азотную ловушку 7.

\* Примечание: Разработка предохранительной системы с использованием элементов установки КГУ проведена при самом активном участии Н.Н. Агапова и В.А. Белушкина.

### 13. Выводы и предложения.

#### а) Выводы.

1. На основе существующего в НИКО опыта эксплуатации гелиевых криостатов и транспортных сосудов принято допущение, что вероятность появления течей через большие отверстия (порядка десятков мм<sup>2</sup>) в изоляционное пространство криостата СПИН пренебрежимо мала при соблюдении некоторых условий. В частности, все хрупкие детали (стеклянные вакуумные лампы и пр.) должны быть устранены или надежно защищены; в период запуска, до появления в криостате большого количества жидкого гелия, необходимо вести тщательный контроль натеканий в вакуумную полость и т.д.

2. При неограниченном доступе в изоляционное пространство воздуха или гелия удельные теплопритоки к криостату в последнем случае меньше. Но в реальных аварийных ситуациях количество поступающего газа ограничено размером отверстия. Поэтому теплопритоки к жидкому гелию при натекании воздуха через малые отверстия (см.п.1) сравнительно невелики. Полная порча вакуума гелием через любое отверстие при отсутствии средств откачки гелия происходит неотвратимо, и суммарный теплоприток ко всей поверхности криостата весьма велик. Таким образом, вопреки распространенной точке зрения об опасности воздушной течи, считаем, что наиболее тяжелая аварийная ситуация возникает при порче вакуума гелием.

3. Экспериментальным путем доказано, что возможно существенное ограничение аварийного теплопритока к криостату с помощью азотного экрана.

4. Расчетами установлено, что аварийное кипение гелия в криостате при полной порче изоляционного вакуума сопровождается выбросом жидкого гелия в теплый обратный поток.

5. Разработан и испытан опытный предохранительный клапан  $d_y = 50$  мм новой конструкции.

6. Предложено использование вместо мембран предохранительных заглушек с разрывными болтами.

7. Впервые в практике создания предохранительных систем выделены предаварийные (или переходные) ситуации и предусмотрены меры по быстрому удалению жидкого гелия из криостата.

8. Получены экспериментальные данные о процессах аварийного вскипания гелия, в том числе удельные количества испаряющегося в единицу времени гелия при различной изоляции криостата и видах натекающего в изоляционное пространство газа.

9. Необходимо продолжить работы по криогенной предохранительной системе, в том числе:

а) Испытать опытные предохранительные заглушки  $d_y = 250$  мм.

б) Разработать чертежи предохранительного клапана-заглушки  $d_y = 250$  мм.

в) Провести дополнительные расчетные и экспериментальные исследования для получения данных о степени неравновесности кипения гелия в различных условиях, о кипении при постоянном давлении, нагреве гелия в теплых трубах и др.

#### б) Предложения.

Проведенные в НИКО разработки и исследования позволяют сделать следующие рекомендации.

#### Предаварийные ситуации.

Между моментом появления гелиевых течей и окончательной порчей изоляционного вакуума иногда имеется время, достаточное для удаления жидкого гелия из криостата, что позволяет снизить степень

опасности аварийной ситуации. Поэтому необходимо установить следующее дополнительное оборудование:

1. Гелиевый течеискатель или другое устройство для постоянного слежения за появлением гелиевых течей в изоляционном пространстве криостата и соответствующую сигнализацию на пульте установок КГУ и СПИИ.

2. Холодные цистерны, трубопроводы и автоматизированные вентили для быстрой эвакуации жидкого гелия из криостата. Управление операциями должно осуществляться с пульта КГУ.

3. Предохранительные клапаны (4 шт.)  $d_y = 50$  мм, отрегулированные на давление открытия  $\sim 0,5$  ати, связанные трубами с трубопроводом теплого обратного гелия. Конструкция клапана должна обеспечивать возможность их уплотнения через несколько минут после их кратковременного открытия и прохождения потока холодного гелия.

4. Высоковакуумные насосы для откачки гелия из изоляционного пространства криостата, например, диффузионные (желательны для удлинения периода порчи вакуума).

Вариант предохранительной системы при изоляции криостата лавсановой пленкой.

1. Установить на равном расстоянии по длине криостата 4 дополнительных трубы аварийного сброса внутренним диаметром  $\sim 250$  мм. Для уменьшения гидравлического сопротивления кромки на входе и выходе из трубы должны быть скруглены, компенсационный сильфон желательно установить на вакуумном кожухе трубы сброса.

2. Снабдить выходы из труб сброса предохранительными заглушками, отрегулированными на давление открытия 0,7 ати (Разработка заглушек ведется в НИКО).

3. Разработать и установить в криостате вытеснители жидкого гелия для уменьшения его количества (в 1,5-2 раза), что позволит запускать СПИН при меньшем запасе газообразного гелия, уменьшит объем газгольдеров для сбора гелия при аварии и снизит его потерю в отсутствии газгольдеров. Конструкция вытеснителя должна отвечать требованию уменьшения гидравлического сопротивления тракта криостата движению гелия при аварии. Заливать в криостат минимальное количество гелия.

Вариант предохранительной системы при наличии азотного экрана в криостате.

1. Установить в криостате экран, охлаждаемый жидким азотом (78К) или газообразным гелием (до 30К), снять суперизоляцию с гелиевого сосуда.

2. Установить I трубу аварийного сброса с внутренним диаметром 250 мм.

3. Снабдить выход из трубы сброса предохранительным клапаном-заглушкой, отрегулированным на давление открытия 0,7 атм. Конструкция клапана, отличающаяся от примененной в разделе 2, разработана в НИКО (исключено случайное срабатывание).

4. Связать клапан с аварийными газгольдерами трубопроводом диаметром ~0,6 м (длина 50-100 м). Трубопровод снабдить компенсаторами.

5. Приобрести и смонтировать газгольдеры с общей геометрической емкостью ~1200 м<sup>3</sup> (при отсутствии вытеснителей жидкого гелия). Предстоит сделать выбор между двумя вариантами газгольдеров - мягкими и жесткими.



### Конструкция криостата.

1. Провести многократное (~ 20 раз) охлаждение от комнатной до азотной температуры керамических изоляторов (4-5 штук) с постоянной проверкой их герметичности на гелиевом течеискателе для проверки надежности их соединения с металлическими патрубками.

2. Исключить, по возможности, керамические изоляторы в токовводах на участках между вакуумным пространством и гелием, воздухом.

Измерить электрическую прочность между плюсовым и минусовым токоведущими элементами в присутствии гелия.

### Продолжение разработок и исследований.

Более тщательная проработка конструкции предохранительной системы может позволить уменьшить диаметр аварийного трубопровода к газгольдерам, снизить необходимую емкость жестких газгольдеров и т.д. Для этой проработки необходимы следующие экспериментальные данные:

1. Температуры гелия в криостате, клапане, трубопроводе и газгольдере при аварийном выбросе гелия. Измерения провести на установке по изучению аварийного кипения гелия.

2. Коэффициенты гидравлического сопротивления в криостате СПИНа и тракте предохранительной системы. Для получения этих данных провести продувку воздухом (или гелием) криостата СПИНа с выводом воздуха в атмосферу у предохранительной заглушки,

### 14. Заключение.

Авторы выражают благодарность Н.Н.Агапову, В.А.Белушкину и Ю.К.Пилипенко за полезные обсуждения, Ю.В.Романову и А.Г.Анищенко за помощь в работе.

Анищенко  
Валентин  
Горюхов  
Завис  
Ильин  
Ильин

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Н.Н.Агапов, А.К.Суханова. Особенности криообеспечения ускорителя со сверхпроводящими магнитами, погруженными в кипящий гелий. Сообщения ОИЯИ, 8-83-702, Дубна, 1983.
2. А.И.Пипко, В.Я.Плисковский, Е.А.Пенчко. Конструирование и расчет вакуумных систем. Энергия, М., 1970.
3. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Энергия, М., 1973.
4. Н.Т.Романенко, Ю.Ф.Куликов. Криогенная арматура. Машиностроение, М., 1978, с.35-38, рис.28.
5. Т.Ф.Кондратьева. Предохранительные клапаны. Л., Машиностроение, 1976.
6. Криогенные приборы и устройства в ядерной физике. Энергоиздат, М., 1982.
7. И.А.Шелаев и др. Препринт ОИЯИ, 19-82-383, Дубна, 1982.

Основные параметры криостата установки СПИИ

I. Длина гелиевого криостата (м)	54
2. Диаметр гелиевого криостата (мм)	285
3. Толщина стенки гелиевого сосуда (мм)	2
4. Диаметр вакуумного кожуха криостата (мм)	405
5. Толщина стенки вакуумного кожуха (мм)	3
6. Материал стенки вакуумного кожуха	Ст.3
7. Высота газообразного гелия в криостате (мм)	25
8. Объем жидкого гелия в криостате (дм <sup>3</sup> )	3300
9. Объем газообразного гелия в криостате (дм <sup>3</sup> )	130
10. Рабочее давление в криостате (ати)	≤ 0,3
11. Максимальное давление в криостате (ати)	0,7
12. Диаметр трубы аварийного сброса (мм)	50
13. Количество труб аварийного сброса	4
14. Внутренний диаметр фарфорового изолятора (мм)	53
15. Количество изоляторов	34
16. Количество слоев изоляции металлизированного лавсана на гелиевом криостате	50
17. Азотный экран	нет
18. Номинальный рабочий ток в магнитах (А)	2030
19. Запасенная в магнитах энергия (кДж)	155

Расчет максимальной температуры обмотки дипольных магнитов.

В период эвакуации энергии наиболее нагретыми под действием транспортного тока оказываются те участки обмотки, в которых первоначально зародилась нормальная зона. Из условия сохранения свойств витковой электрической изоляции, в которой использована лавсановая пленка, примем допустимую максимальную температуру проводника  $T_{\text{макс}}$  равной  $\sim 400\text{K}$ .

Для оценки необходимого для обеспечения данной величины  $T_{\text{макс}}$  напряжения эвакуации энергии  $U_0$  (начальное значение при эвакуации на омическое сопротивление  $R$ ) воспользуемся уравнением (с.106 /6/)

$$F(T) = \frac{1 + \alpha}{\alpha} \cdot \frac{E_0 \cdot j_0^2}{U_0 \cdot i_0} \quad (I)$$

Уравнение выведено из условия адиабатического нагрева элементарного объема проводника транспортным током с начальной величиной  $i_0$ . Здесь  $\alpha$  - соотношение сечений матрицы и сверхпроводника в проводнике,  $j_0$  - начальная плотность тока в проводнике,  $E_0$  - запасенная в 24 дипольных магнитах энергия. Функция

$$F(T) = \int_0^{T_{\text{макс}}} \frac{c(T)}{\rho_n(T)} dT,$$

где  $c(T)$  - удельная теплоемкость проводника (объемная),

$\rho_n(T)$  - удельное сопротивление матрицы.

Примем индуктивность цепи магнитов  $L = 0,075 \text{ Гн}$ ,

$i_0 = 2500 \text{ А}$ , тогда  $E_0 = 0,234 \text{ МДж}$ .

Проводник представляет собой шинку, свитую из 12 проводов диаметром 0,5 мм с коэффициентом заполнения провода сверхпроводником равным 0,43. Без учета находящегося в шинке припоя  $\alpha = 1,326$ ,

сечение проводника  $S = 2,36 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ,  $j_0 = 1,06 \cdot 10^9 \text{ А.м}^{-2}$ ,  
 $E_0 \cdot j_0^2 = 0,26 \cdot 10^{24}$ .

Если принять упрощения, что удельная теплоемкость проводника равна удельной теплоемкости матрицы, а удельное сопротивление сверхпроводника  $\rho_s \rightarrow \infty$ , то для медной матрицы с

$\rho_{300/\rho_{4,2\text{К}}} = 100$  по рис.6 при  $T_{\text{макс}} = 400\text{К}$  находим величину  $F(T) = 1,56 \cdot 10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{м}^{-4} \cdot \text{с}$ . Тогда из уравнения (I) находим

$$U_0 = \frac{1 + \alpha \cdot E_0 \cdot j_0^2}{\alpha \cdot F(T) \cdot L_0} = \frac{1 + 1,326}{1,326} \cdot \frac{0,26 \cdot 10^{24}}{2,5 \cdot 10^3 \cdot 1,56 \cdot 10^{17}} \approx 1170 \text{ В.}$$

Более точные результаты дает расчет по кривой 2 (рис.6).

В этом случае учтена действительная теплоемкость композитного проводника (правда, с  $L = 1$ ) и  $F(T) \approx 2 \cdot 10^{17}$ ,  $U_0 \approx 910 \text{ В}$ .

Расчет на ЭВМ по разработанной в НИКО программе, также учитывающей действительную теплоемкость композитного проводника, дает  $T_{\text{макс}} = 270\text{К}$  при  $U_0 = 1200\text{В}$ .

Полученные величины  $U_0$  превышают планируемое на СПИНе  $U_0 = 500\text{В}$ .

Однако в расчете величины  $T_{\text{макс}}$  не учтены теплоемкости припоя, клея, витковой изоляции и теплообмена с гелием.

Для разработки устройства электрической защиты магнитов целесообразно провести экспериментальное измерение величины  $T_{\text{макс}}$  на дипольном магните в рабочих условиях. При этом следует обеспечить ту же постоянную времени падения тока, что и в установке СПИН.

Приняв  $U_0 = 500\text{В}$ , получим

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} = \frac{500}{2500} = 0,2 \text{ Ом,}$$

$$\tau = \frac{L}{R_0} = \frac{0,075}{0,2} = 0,375 \text{ с.}$$

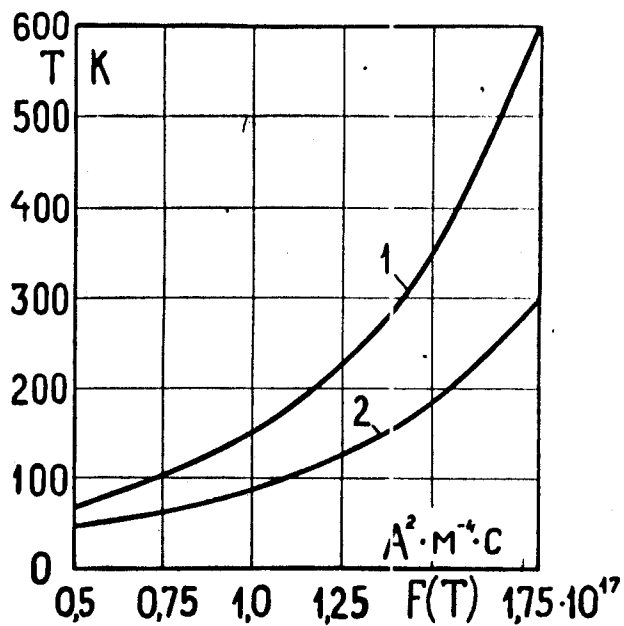


Рис.6. Функция  $F(T)$  для меди (кривая 1) с

$\rho_{300} / \rho_{4,2K} = 100$  и композитного проводника (кривая 2),

$$F(T) = \int_0^T \frac{C_{np}(T)}{\rho_n(T)} dT,$$

где  $C_{np} = \frac{C_s + \alpha C_n}{1 + \alpha}$

и при  $\alpha = 1$ ,  $\rho_{300} / \rho_{4,2K} = 100$

Для повышения эффективности эвакуации энергии (если это потребуется) необходимо ограничивать распространение нормальной области. Для этого можно обеспечить криостатическую стабилизацию проводника на участках между магнитами, напаяв на проводнике медные шинки.

Повидимому, полезно экспериментально определить стабильность обмотки магнитов при эвакуации с различными скоростями. Не исключено, что возникающие в проводнике при эвакуации энергетические потери при некоторых условиях могут привести к переходу обмотки в нормальное состояние.