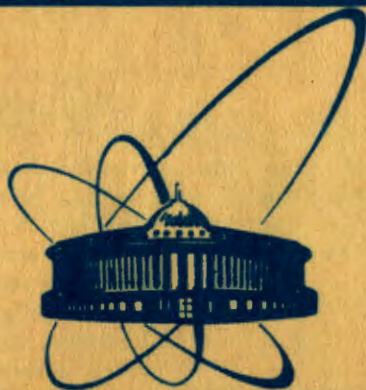
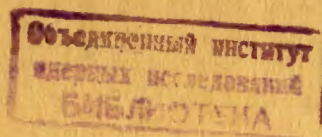


83-702

1937



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна



8-83-702

Н.Н.Агапов, А.К.Суханова

ОСОБЕННОСТИ КРИООБЕСПЕЧЕНИЯ
УСКОРИТЕЛЯ
СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ МАГНИТАМИ,
ПОГРУЖЕННЫМИ В КИПЯЩИЙ ГЕЛИЙ

1983

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, при криостатировании сверхпроводящих магнитных систем крупнейших ускорителей оптимальными являются циркуляционные схемы ^{/1,2/}, в которых тепло отводится в жидкостный или парожидкостный поток гелия, протекающий в расположенных вблизи обмоток каналах. Сравнительно же небольшие одиночные магниты традиционно предпочитают охлаждать посредством погружения их в кипящий гелий. Погружной способ применим и для систем протяженностью в несколько десятков метров, однако при проектировании таких систем следует учитывать ряд особенностей: различный уровень жидкости в различных точках периметра установки, специфические условия работы предохранительных клапанов, большой запас жидкого гелия и трудности его эвакуации в случае аварии. Рассмотрим некоторые из этих особенностей применительно к ускорителю ^{/3/}, разрабатываемому в Лаборатории высоких энергий.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ ПО ПЕРИМЕТРУ УСКОРИТЕЛЯ

Пусть в процессе криостатирования /рис.1/ к участку периметра длиной L подводится некоторое количество G жидкого гелия. В общем случае этот поток может содержать небольшую долю пара x , обусловленную теплопритоком на пути от рефрижератора. Образующийся пар, тоже в количестве G , отводится с противоположной стороны рассматриваемого участка.

Движение паровой фазы сопровождается потерей давления на трение. Следовательно, давление паровой фазы в разных точках участка не может быть одинаковым. Эта разница приводит к зависимости уровня жидкости от длины $h = h(z)$. Проанализируем характер этой зависимости.

Изменение давления в паровой фазе можно записать, как

$$dp = \lambda \frac{\rho_{\text{п}} w^2}{2} \frac{dz}{d_{\Gamma}}, \quad /1/$$

где λ - коэффициент трения; $\rho_{\text{п}}$ - плотность паров гелия; w - скорость движения пара; d_{Γ} - гидравлический диаметр доли сечения криостата /сегмента/, приходящейся на паровую фазу.

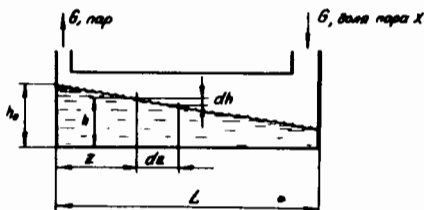


Рис. 1

Так как жидкая фаза по оси z не перемещается, это изменение может быть записано также в виде

$$dp = -\rho_{ж} g dh, \quad /2/$$

где $\rho_{ж}$ - плотность жидкости, g - ускорение свободного падения.

Приравнивая /1/ к /2/, получим изменение уровня жидкости на участке малой длины dz :

$$dh = -\lambda \frac{\rho_{п} w^2 dz}{\rho_{ж} 2g d_{г}}. \quad /3/$$

Скорость паровой фазы находим из уравнения неразрывности $w = \frac{G_{п}}{\rho_{п} f}$,

где $G_{п} = G_{п}(z)$ - расход пара; $f = f(z)$ - сечение сегмента, занятого паром. Подставляя w в /3/, имеем

$$dh = -\frac{\lambda}{2g\rho_{ж}\rho_{п}} \left(\frac{G_{п}}{f}\right)^2 \frac{dz}{d_{г}}. \quad /4/$$

Если тепловая нагрузка по длине участка распределена равномерно, расход пара $G_{п}$ линейно изменяется в зависимости от z :

$$G_{п} = G \left[1 - (1-x) \frac{z}{L}\right]. \quad /5/$$

Естественно, что при $z=0$ $G_{п}=G$, а при $z=L$ $G_{п}=xG$. Подставляя /5/ в /4/, получим следующее выражение для dh :

$$dh = -\frac{\lambda}{2g\rho_{ж}\rho_{п}} \frac{G^2 \left[1 - (1-x) \frac{z}{L}\right]^2}{f^2} \frac{dz}{d_{г}}. \quad /6/$$

Пусть на длине L ускорителя к нему подводится количество тепла Q . Если паросодержание на входе в участок равно x , а на выходе - единице, то можно записать: $Q = \frac{Q}{r(1-x)}$, где r - теплота парообразования. Подставив это выражение в /6/, получим формулу для расчета в окончательном виде:

$$dh = -\frac{\lambda}{2g\rho_{ж}\rho_{п}} \left\{ \frac{Q \left[1 - (1-x) \frac{z}{L}\right]^2}{r f (1-x)} \right\} \frac{dz}{d_{г}}. \quad /7/$$

Площадь сечения f и гидравлический диаметр $d_{г}$, зависящие от уровня жидкости h , определяются из геометрических соображений

/рис.2/: $f = \frac{\phi}{4} D^2 - ah_2$ и $d_{г} = \frac{4f}{p}$, где $h_2 = h - \frac{D}{2}$; $a = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - h_2^2}$; $\phi = \arctg \frac{a}{h_2}$; $p = \phi D + 2a$ - смоченный периметр.

Входящий в /7/ коэффициент сопротивления определяется в зависимости от критерия Рейнольдса $Re = \frac{w d_{г} \rho_{п}}{\eta}$, где η - вязкость пара, по известным соотношениям /4/:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{64}{Re}, & Re < 2300, \\ 0,3164 Re^{-0,25}, & 2300 < Re < 10000, \\ 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,273}}, & 10^4 < Re < 10^8. \end{cases}$$

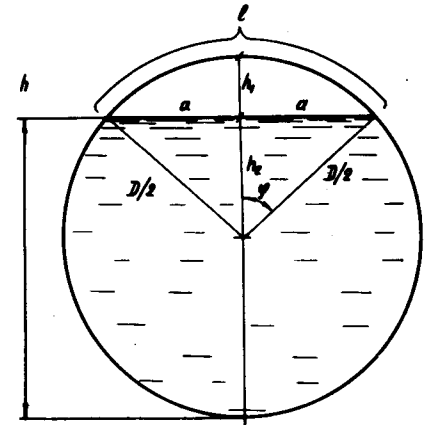


Рис.2

Рассмотрим результаты численного интегрирования уравнения /7/ для ускорителя длиной $L = 50$ м и диаметром криостата $D = 0,28$ м. Предварительные оценки суммарной тепловой нагрузки дали величину $Q = 500$ Вт. Результаты расчета представлены на рис.3. При доле пара на входе $x = 0,1$ уровень жидкости изменяется на 16 мм - от

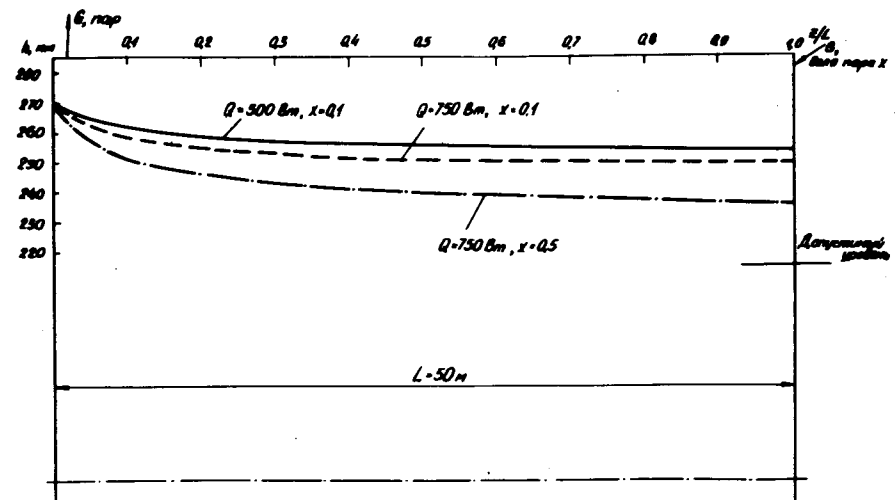


Рис.3

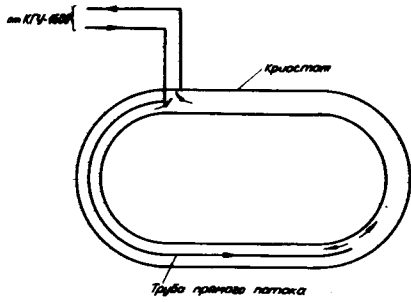


Рис. 4

$h = 254 \text{ мм}$ до $h = 270 \text{ мм}$. Повышение тепловой нагрузки до 750 Вт^* приводит к увеличению Δh до 21 мм . При $Q = 750 \text{ Вт}$ и $x = 0,5$ величина Δh достигает 34 мм . Эффект изменения уровня в этом случае настолько велик, что приводит к необходимости ставить промежуточный сепаратор, обеспечивающий паросодержание на входе в участок не более $0,1$, или делить полный периметр установки на части.

Реализовать деление только на две части очень просто /рис.4/.

Жидкий гелий от криогенной гелиевой установки /КГУ/ по трубе, расположенной внутри криостата ускорителя, подается в диаметрально противоположную точку по отношению к месту отвода пара. Пар отводится по двум направлениям, причем длина каждого отвода составляет половину всего периметра установки. Схема имеет и другие преимущества: прямой поток перед выходом из подающей трубы в криостат дополнительно конденсируется**, нет необходимости в каких-либо перегородках внутри криостатов.

На рис.5 сравниваются результаты расчетов для участков с полной $L = 50 \text{ м}$ и половинной $L = 25 \text{ м}$ длиной. Как видно из рисунка, в половинном варианте изменение уровня незначительно даже при $x = 0,5$.

Рис.6 иллюстрирует, как изменяется уровень жидкости по мере наполнения криостата при $L = 25 \text{ м}$. Поверхность жидкости остается почти горизонтальной вплоть до $h = 270 \text{ мм}$. Это гарантирует не только надежное погружение всех магнитов, но и отсутствие выплескиваний жидкости по трубопроводу обратного потока в установку КГУ.

На рис.3,5 и 6 приведены результаты, соответствующие температуре криостатирования $4,5\text{К}$. При переходе на более низкую температуру, например $3,8\text{К}$, эффект изменения уровня усиливается /рис.7/. Это обусловлено уменьшением плотностей пара и жидкости /7/. Такое увеличение Δh не позволяет осуществить крио-

* Вполне вероятно, что теплопритоки составят величину, которая больше расчетной, поэтому система криостатирования должна проектироваться с определенным запасом.

** Давление в трубопроводе прямого потока больше, чем давление в криостате, следовательно, температура протекающей в нем парожидкостной смеси выше, чем температура жидкости в криостате. Эту разность температур можно использовать для отвода тепла от прямого потока, т.е. для дополнительной конденсации.

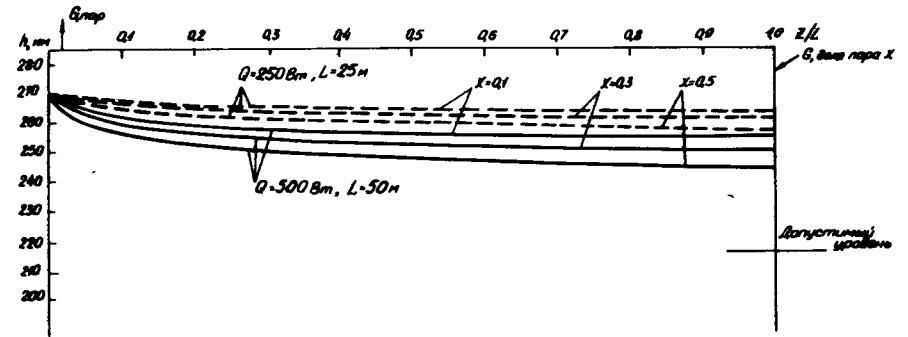


Рис. 5

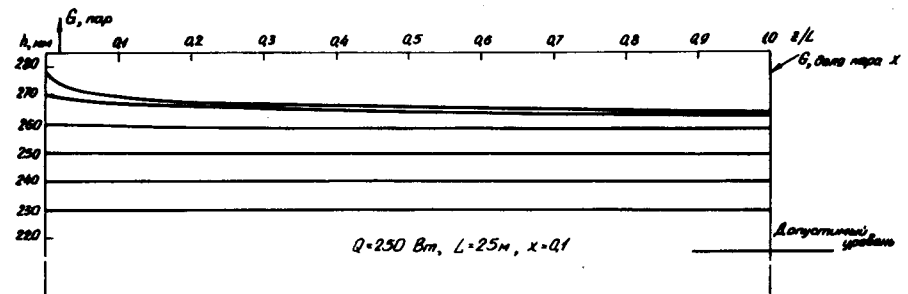


Рис. 6

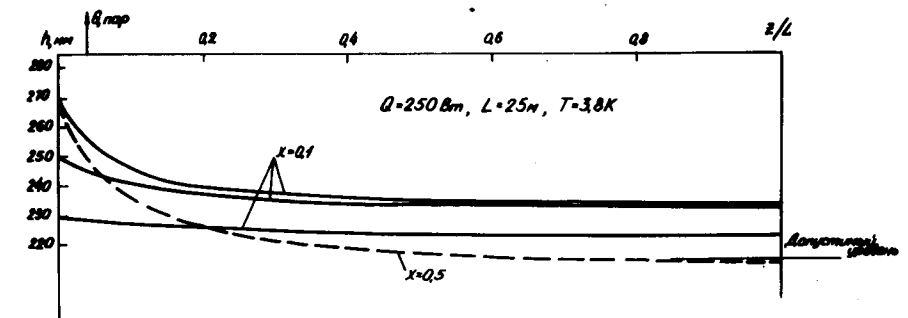


Рис. 7

статирование при $3,8\text{К}$ даже и в половинном варианте: требуется разбить периметр установки на большее чем два число участков.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В горизонтальном криостате ускорителя /в отличие от обычных погружных систем/ содержится очень мало паров гелия. Объемная

доля пара $\beta = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{п}} + V_{\text{ж}}}$, где $V_{\text{п}}$ и $V_{\text{ж}}$ - объемы соответственно

паровой и жидкой фаз - в зависимости от уровня заливки криостата показаны на рис.8. Если, например, уровень жидкости составляет 80% диаметра криостата, то величина β равна всего 0,11.

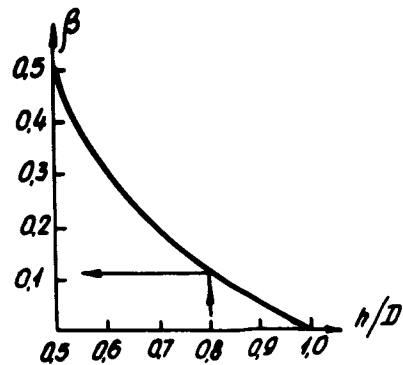


Рис.8

Рассмотрим процесс аварийного повышения давления, происходящий непосредственно перед срабатыванием сбросного предохранительного устройства. Этот процесс идет при постоянном объеме и, следовательно, в диаграмме давление - удельный объем /рис.9/ изображается вертикальной линией. Процесс повышения давления на диаграмме обозначен точками 1 и 2. Кроме того, на диаграмму нанесена левая пограничная кривая ($\beta = 0$) и линии одинакового объемного паросодержания. Из рисунка видно, что изо-

хорное увеличение давления приводит к уменьшению объемного паросодержания, т.е. к росту уровня жидкости*. Так, при начальных параметрах $T = 4,5\text{K}$ и $\beta = 0,11$ в точке 2, соответствующей давлению 1,75 бар, весь объем криостата занят жидким гелием.

Эффект роста уровня жидкости требует изменения подхода к расчету площади проходных сечений предохранительных устройств. Когда $V_{\text{п}} > V_{\text{ж}}$, расчетная схема традиционна /рис.10а/. Согласно этой схеме количество пара, генерируемое в криостате определенной величиной теплопритока Q и отводимое предохранительным устройством, определяется как $G_{\text{пр. пар.}} = \frac{Q}{r}$. Если $V_{\text{п}} < V_{\text{ж}}$, что соответ-

ствует рассматриваемому случаю, то при аварии жидкость может занимать весь объем криостата, т.е. сечение предохранительного устройства оказывается перекрытым жидкостью /рис.10б/. В этом случае количество пара, которое генерируется в криостате, остается прежним, однако отводится жидкость. Причем для того, чтобы давление в криостате не повышалось, объемный расход отводимой жидкости должен быть равен объему генерируемого пара. Отсю-

* Рост уровня жидкого гелия при повышении давления в криостате неоднократно наблюдался нами в ходе различных экспериментов.

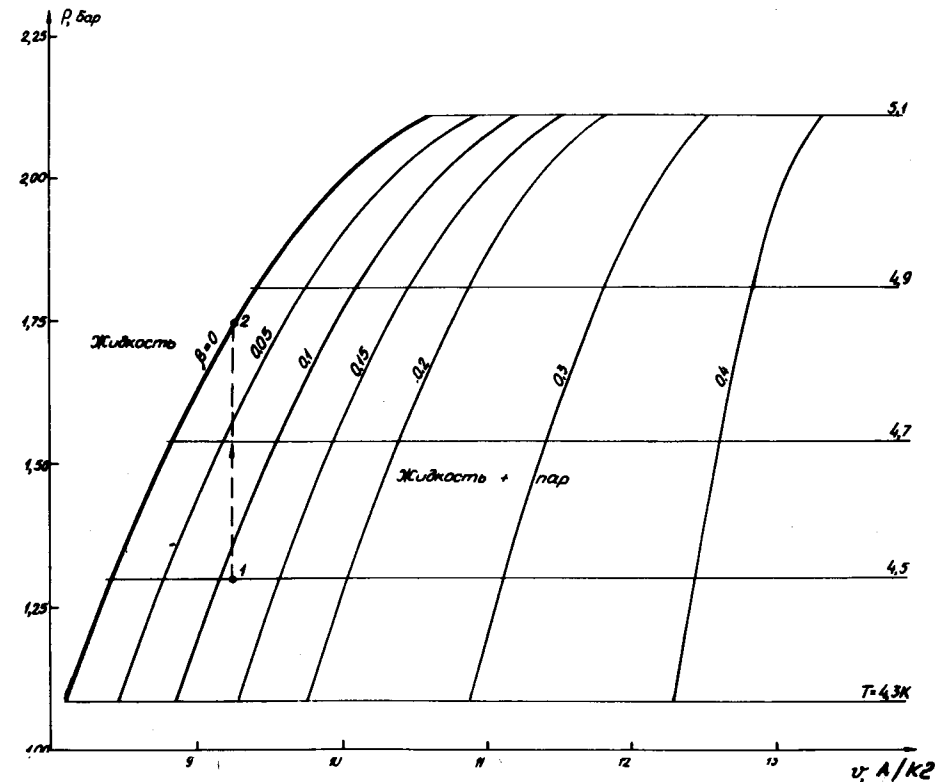


Рис.9

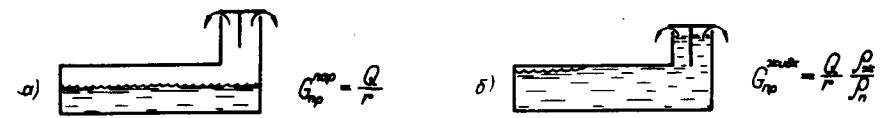


Рис.10

да следует $G_{\text{пр. жидк.}} = \frac{Q}{r} \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{п}}}$. Как показывают расчеты, площадь сечения предохранительных устройств для отвода жидкости в количестве $G_{\text{пр. жидк.}}$ существенно больше, чем для отвода пара, генерируемого теплопритоком Q . Действительно, в формуле для расчета гидравлического сопротивления $\Delta p = \xi \frac{\rho w^2}{2}$ в обоих случаях скорости одинаковы, т.к. одинаковы объемные расходы вытекающих сред, а плотность увеличивается от $\rho_{\text{п}}$ до $\rho_{\text{ж}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что

1/ при использовании погружной системы криостатирования сверхпроводящих магнитов ускорителя длиной в несколько десятков метров следует учитывать, что уровень жидкого гелия может существенно различаться в разных точках периметра установки; эффект изменения уровня уменьшается, если разбить полный периметр установки на части и криостатировать их независимо; при снижении температуры криостатирования этот эффект усиливается;

2/ при расчете предохранительных устройств для сброса гелия большое значение имеет изохорный процесс подъема давления, предшествующий моменту срабатывания предохранительной системы; в результате такого подъема уровень жидкости растет и закрывает проходное сечение для пара. Этот процесс может быть и таким, что в конце его исчезает паровая фаза, т.е. криостат полностью залит жидкостью.

Авторы выражают благодарность профессору А.Г.Зельдовичу, прочитавшему работу в рукописи и сделавшему ряд важных замечаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Криогенные приборы и устройства в ядерной физике./Под ред. А.Г.Зельдовича/. Энергоиздат, М., 1982.
2. Агапов Н.Н., Белушкин В.А., Зельдович А.Г. ЭЧАЯ, 1982, т.13, вып.5, с.982.
3. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-82-383, Дубна, 1982.
4. Справочник по физико-техническим основам криогеники. /Под ред. М.П.Малкова/. "Энергия", М., 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 октября 1983 года.

Агапов Н.Н., Суханова А.К.

8-83-702

Особенности криообеспечения ускорителя со сверхпроводящими магнитами, погруженными в кипящий гелий

Рассмотрены особенности криостатирования ускорителя с погруженными в кипящий гелий сверхпроводящими магнитами. Показано, что уровень жидкого гелия может существенно различаться в различных точках периметра установки. Это вызвано гидравлическим сопротивлением отводимых паров. Приводится уравнение для расчета уровня жидкого гелия и результаты его численного интегрирования. Показано, что эффект изменения уровня можно уменьшить разбивкой полного периметра установки на части. Этот эффект усиливается при снижении температуры криостатирования. Анализируются особенности расчета предохранительных устройств. Показано, что при таком расчете большое значение имеет изохорный процесс подъема давления, предшествующий срабатыванию предохранительной системы. Этот процесс приводит к повышению уровня жидкого гелия и, как следствие, частичному или полному закрытию проходных сечений для пара.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Agapov N.N., Sukhanova A.K.

8-83-702

Special Properties of the Refrigeration of an Accelerator with a Superconducting Magnets Immersed into Boiling Liquid Helium

Some special properties of the refrigeration of an accelerator with a superconducting magnets immersed into boiling liquid helium are considered. It is shown that the level of liquid helium can be significantly varied along the length of the accelerator. This is due to a hydraulic resistance of the removed vapours. An equation for calculating the level of liquid helium and results of its numerical integration are presented. It is shown that the effect of varying the level can be decreased by dividing the total perimeter of the accelerator into parts. This effects becomes stronger with decreasing the temperature of refrigeration. Special features of calculation of safety devices are analysed. It is shown that the isochoric process of pressure increases, which precedes the safety action, is of importance for such a calculation. This process leads to increasing the level of liquid helium and, as a consequence, to a partial or full closing of the sections for vapour passage.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой