

7649

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



7649

Экз. чит. зала

1 - 7649

И.В.Богуславский, Н.М.Вирясов, С.Высочил,
Ю.Д.Зернин, В.А.Русаков, В.Т.Толмачев,
Е.П.Устенко, Ю.В.Хренов

СИСТЕМА И РЕЖИМ ОХЛАЖДЕНИЯ
ДВУХМЕТРОВОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ
ВОДОРОДНОЙ КАМЕРЫ "ЛЮДМИЛА"

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1 - 7649

И.В.Богуславский, Н.М.Вирясов, С.Выскочил,
Ю.Д.Зернин, В.А.Русаков, В.Т.Толмачев,
Е.П.Устенко, Ю.В.Хренов

СИСТЕМА И РЕЖИМ ОХЛАЖДЕНИЯ
ДВУХМЕТРОВОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ
ВОДОРОДНОЙ КАМЕРЫ "ЛЮДМИЛА"

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс охлаждения криогенных пузырьковых камер, в частности, водородных, является вспомогательным. Затраты времени на его проведение непроизводительны, поэтому естественно стремление сократить этот процесс. Однако с точки зрения исправности и правильного функционирования установки и ее отдельных узлов он является наиболее критичным. Ход процесса зависит как от геометрии конструкции, компоновки и мощности теплообменников, так и от физико-механических характеристик используемых материалов. В связи с этим для каждой камеры его требуется проводить особым образом.

Сильная зависимость от геометрии обусловлена тем, что из-за необходимости обеспечения достаточной прочности или по конструктивным соображениям приходится применять узлы разной толщины, причем разнотолщинность может достигать сотен процентов. Это осложняет теплопередачу и приводит к появлению больших температурных градиентов.

В конструкции камеры применяются материалы с весьма различными характеристиками. Наихудшим комплексом характеристик отличается стекло. Плохая теплопроводность, большая теплоемкость, значительный температурный коэффициент линейного расширения, малая величина разрушающих напряжений - обуславливают чрезвычайную чувствительность стекла к условиям охлаждения. Положение усложняется еще и тем, что механическая прочность стекла в сильной степени зависит от микросостояния поверхности, которое в процессе эксплуатации трудно контролировать.

Все эти обстоятельства требуют внимательного рассмотрения при проектировании системы охлаждения, большой осторожности и надежного контроля при проведении процесса.

В настоящей работе авторы приводят описание системы охлаждения, осуществленной на камере ОИЯИ - "Людмила", и экспериментальные результаты, полученные при отработке режима охлаждения.

2. ВЫБОР МОЩНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

При проектировании системы охлаждения задача сводится к определению мощности теплообменников и к выбору их пространственной компоновки.

Ответ на интересующие нас вопросы можно было получить, решив систему уравнений, описывающих динамику процесса. Такой подход привел бы нас к необходимости решать систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами, являющимися функциями пространственных координат и температуры. Точное решение таких систем уравнений возможно только в простейших случаях. Приближенное решение, по-видимому, возможно. Однако для этого требуется, как правило, огромный объем вычислительной работы.

Наиболее приемлемым нам представляется иной подход. Суть его заключается в проведении приближенной оценки потребной мощности, исходя из баланса тепла для ряда фиксированных значений температур, если считать, что коэффициенты, характеризующие процесс, постоянны, а температура изменяется линейно от крышки камеры к рабочему объему. Далее по результатам пробных охладений камеры производится необходимая корректировка мощности и компоновки теплообменников.

При каждой температуре теплообменники должны обеспечивать отвод тепла, поступающего в систему извне, и понижать теплосодержание системы с заданной скоростью, т.е.:

$$Q_m = Q + \frac{\delta}{3600} \sum c_i m_i,$$

где: Q_m (Вт) - мощность теплообменников; Q (Вт) - полный теплоприток; c_i (Дж./кг.град.) - коэффициент удельной теплоемкости; m (кг) - масса узла или детали; δ (град/час) - заданная скорость охлаждения характерного элемента конструкции, например, стекла или корпуса камеры.

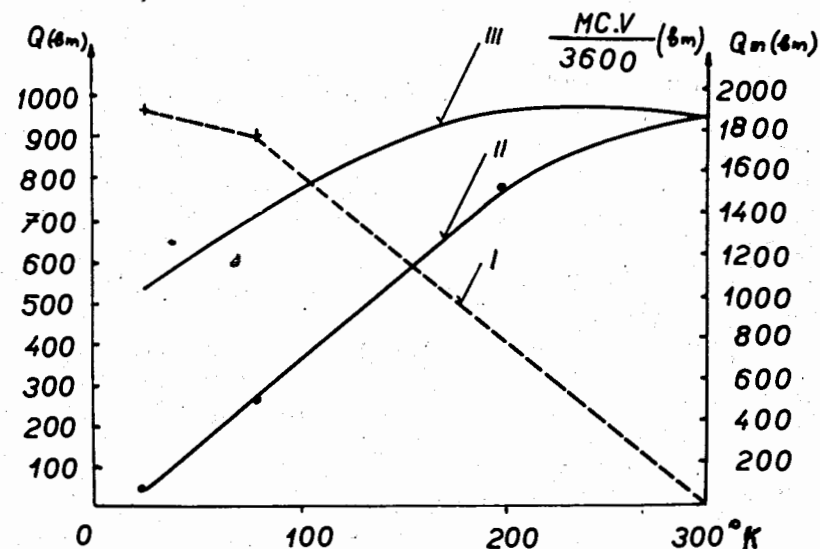


Рис. 1. Графическое изображение баланса мощности при охлаждении: I - теплоприток из окружающей среды; II - мощность, расходуемая на снижение температуры камеры с заданной скоростью /2,5 град/час/; III - полная мощность.

На рис. 1 представлены расчетные зависимости теплопритока и мощности, потребной для охлаждения конструкции, от температуры. При определении мощности, затрачиваемой на охлаждение, допустимая средняя скорость его принята равной 2,5 град/час. Величины коэффициентов λ , ϵ , ϵ /теплопроводности, удельной теплоемкости, степени черноты/ принимались согласно данным работ [1,2]. Отличие теплопритока при 78° К от величины, приведенной в работе [2], объясняется тем, что в настоящей работе учтены теплопритоки по подвеске камеры и по механизму расширения. Кроме того, в условиях теплообмена имеются различия.

Зная $Q_{\text{п}}$, можно определить конструктивные параметры теплообменников и оценить потребность в охлаждающих криогенных жидкостях.

3. СХЕМА И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

В процессе создания камеры система охлаждения неоднократно изменялась. Большая часть изменений касалась элементов управления процессом охлаждения. Мощность азотных теплообменников не изменялась. Водородный теплообменник был увеличен на 20%.

Ниже дается описание системы охлаждения в законченном виде.

Система охлаждения включает в себя два самостоятельных контура - азотный и водородный.

Схема контура азотного охлаждения представлена на рис. 2. Источником жидкого азота являются два азотных резервуара ТРЖК-3, один - рабочий, другой - резервный. Рабочий резервуар имеет устройство для автоматической стабилизации заданного давления. Кроме того, у рабочего резервуара заправка и отбор азота осуществляются по отдельным линиям. Резервный резервуар не имеет каких-либо доработок. Разводка азота потребителям осуществляется магистралью из нержавеющей труб, имеющих пенопластовую изоляцию. К теплообменникам камеры азот подается по сифону, проходящему

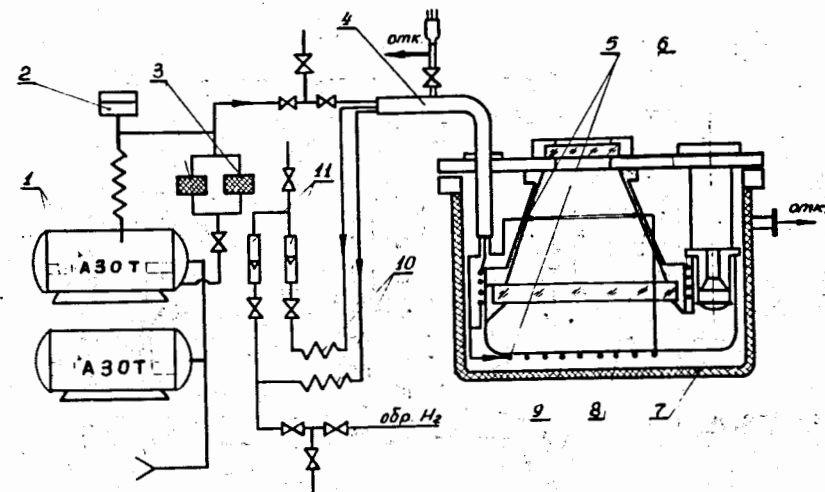


Рис. 2. Схема контура азотного охлаждения: 1 - резервуары с жидким азотом; 2 - стабилизатор давления азота; 3 - фильтры; 4 - сифон; 5 - донные теплообменники; 6 - фланцевые теплообменники; 7 - дьюар камеры; 8 - подвеска камеры; 9 - корпус камеры; 10 - подогревающие теплообменники; 11 - роторы РС-7.

через крышку вакуумного кожуха. Сифон имеет многослойную экрановую вакуумную изоляцию. В качестве экранящего материала применена алюминиевая фольга, проставочным материалом является пылевой перхлорвиниловый фильтр ФПП-1,5. Изоляционное пространство откачивается до давления 10^{-2} тор. Теплообменники выполнены из медной трубки 22 x 1,5 мм. К фланцам конуса и корпуса камеры; к днищу рабочего объема теплообменники припаяны припоем ПОС-40.

Устройство и назначение остальных элементов понятно из схемы.

Контур водородного охлаждения представлен на рис. 3. В связи с тем, что для уменьшения теплопритока к рабочему объему использована дьюарная система теплоизоляции [2], позволяющая иметь атмосферу водорода внутри дьюара как в рабочем режиме, так и в процессе охлаждения, применен теплообменник, не имеющий не-

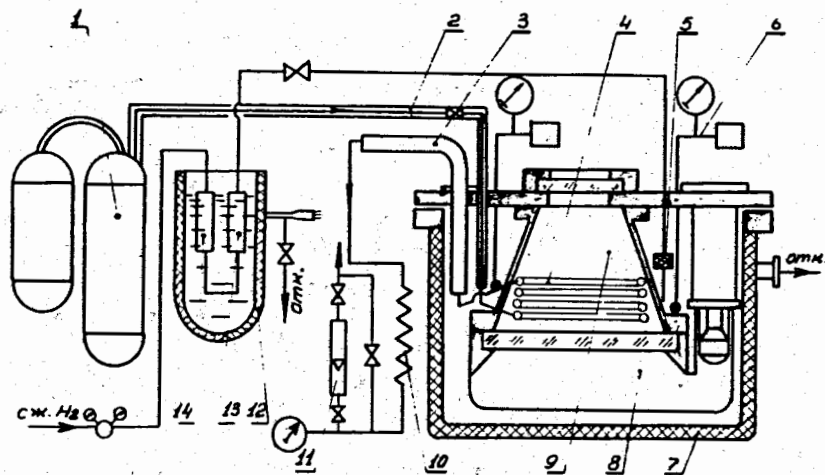


Рис. 3. Схема контура водородного охлаждения: 1 - ожижитель водорода ВО-2; 2-прямая сифонная линия; 3 - обратный сифон; 4 - теплообменник; 5 - фильтр; 6 - конденсационный термометр; 7 - дьюар камеры; 8 - корпус камеры; 9 - конус камеры; 10 - подогревающий теплообменник; 11 - ротаметр РС-7; 12 - дьюар блока очистки; 13 - фильтр; 14 - адсорбер.

посредственного контакта с конструкцией. Такой теплообменник позволяет достаточно эффективно охлаждать всю конструкцию с хорошей равномерностью. Следует заметить также, что этот теплообменник используется и при термостабилизации камеры в рабочем режиме.

Жидкий водород производится с помощью ожижителя ВО-2 ^{1/3}, затем по сифонной линии вводится в камеру и поступает на теплообменник. Теплообменник выполнен из оребренной биметаллической трубки с коэффициентом оребрения ≈ 8 . Внутренняя трубка гладкостенная, 25 x 2 мм, из латуни ЛО-70-1. Внешняя трубка - из материала АД-1, имеет накатанные ребра, с наружным диаметром 49 мм. Выход теплообменника подключен к возвратному сифону, который связан с нагревателем и пультом управления. Изоляция водородных сифонов отличается от изоляции азотных сифонов материалом экранов. В данном случае применен алюминизированный лавсан.

При водородном охлаждении заметно падение давления газообразного водорода в дьюаре. Для пополнения дьюара до необходимого давления - $0,1 \div 0,15$ атм служит устройство - блок очистки, которое имеет следующие основные элементы: дьюар блока очистки, фильтр и адсорбер. Конструкция этого дьюара аналогична конструкции дьюара камеры. В нем автоматически поддерживается заданный уровень жидкого азота.

Внутренние соединения как азотных, так и водородных теплообменников осуществлены пайкой припоем ПСР-45.

После сборки теплообменники подвергаются тщательным испытаниям на плотность. Предварительные испытания проводятся сжатым воздухом. Окончательно плотность контролируется откачкой теплообменников на вакуум с проверкой всех стыков гелиевым течеискателем ПТИ-7.

4. КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ

Для осуществления контроля скорости охлаждения и градиентов температуры использованы медь-константановые термопары. Регистрирующим прибором является многоточечный самопишущий потенциометр типа ЭПП-09. Свободные концы термопар помещены в сосуд с тающим льдом.

Термопары крепятся к контролируемой поверхности с помощью липкой ленты "Scotch", которая была выбрана в результате испытаний различных клеящих средств при температуре жидкого азота.

Во время пробных азотных и водородных охлаждений использовалось большое количество термопар. Они позволили исследовать распределение температур по конструкции, выявить области с повышенными градиентами и отработать приемлемый режим охлаждения. После того как эта работа была в значительной степени выполнена, количество термопар оставлено минимальным, главным образом на стекле и вблизи него. Схема расположения оставшихся термопар приведена на рис. 4. Такая схема позволяет достаточно эффективно и быстро осуществлять необходимый контроль за процессом.

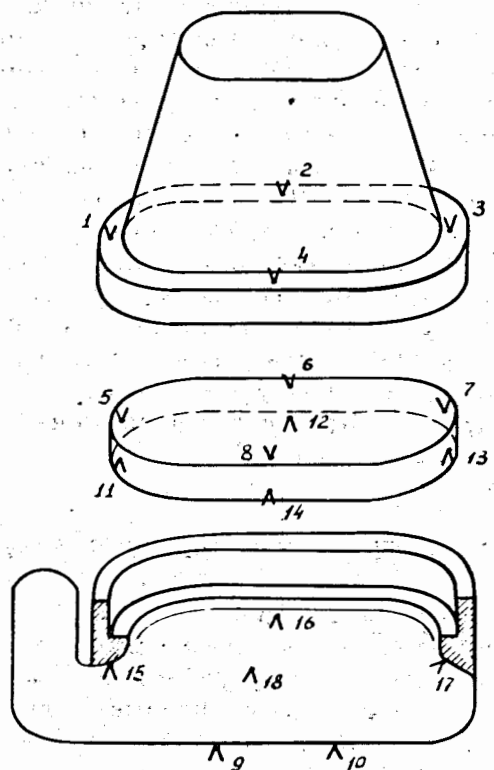


Рис. 4. Схема расположения термопар: 1, 2, . . . , 17 - термопары.

5. ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ

При первых охлаждениях вместо стекла-иллюминатора использовался имитатор из алюминиевого сплава. Хотя теплофизические характеристики стекла и имитатора весьма различны, его использование позволило впоследствии избежать грубых ошибок, отработать в первом приближении режим работы теплообменников, проверить эффективность системы контроля.

Поскольку в начальной стадии охлаждения теплоприток мал, а температурный напор велик, достаточная скорость охлаждения и минимальные градиенты на стекле достигались путем включения в работу только донного теплообменника. Эффективное охлаждение с его помощью возможно осуществлять до температур 170°K /на стекле/. Далее приходится включать в работу фланцевые теплообменники, эффективность которых остается достаточной до температуры $100-110^{\circ}\text{K}$. При охлаждении азотными теплообменниками основной теплоотвод со стекла производится с нижней плоскости. После включения в работу водородного теплообменника происходит смена плоскости основного теплоотвода. Этот переходный процесс требует особого внимания и осторожности. На рис. 5 представлены усредненные по нескольким охлаждениям кривые охлаждения стекла, на которых хорошо прослеживается переходный процесс.

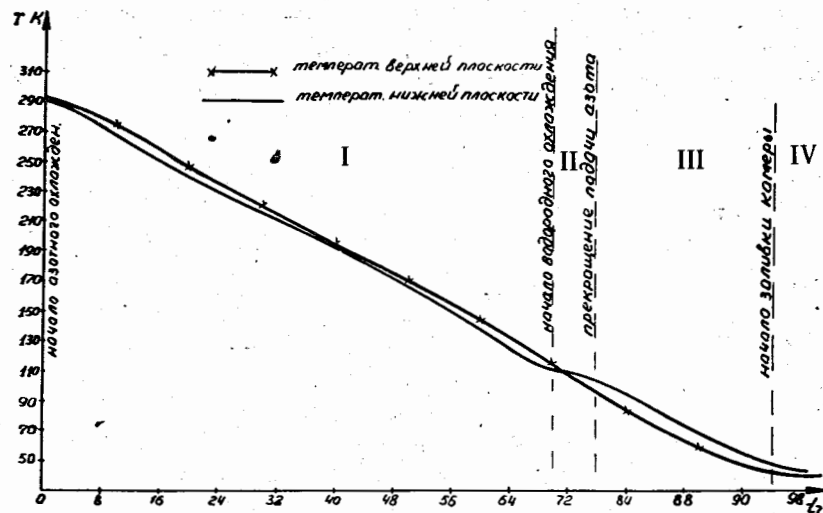


Рис. 5. Кривые охлаждения верхней и нижней плоскости стекла: I - период азотного охлаждения; II - период совместного азотно-водородного охлаждения; III - период водородного охлаждения; IV - период заливки.

Одностороннее охлаждение допускает меньшую скорость охлаждения, чем двустороннее, однако, по причине простоты компоновки теплообменников при одностороннем охлаждении и возможности более надежного контроля, был избран вариант с односторонним охлаждением.

До температуры $90 \div 95^\circ\text{K}$ азотные и водородный теплообменники работают совместно. Затем подача азота прекращается, теплообменники промываются водородом и подключаются к линии обратного водорода, для чего предусмотрены соответствующие элементы схемы.

При температуре стекла $40 \div 45^\circ\text{K}$ начинается подача водорода для наполнения камеры. После этого охлаждение происходит как за счет отвода тепла теплообменником, так и за счет выкипания части водорода, заливаемого в камеру. Уменьшение чувствительности медь-константановых термопар при температурах $40 \div 50^\circ\text{K}$ и ниже затрудняет контроль за дальнейшим ходом процесса. Однако при таких температурах допустимая скорость охлаждения стекла значительно выше первоначальной, и поэтому некоторое отклонение измеренной температуры от фактической большой опасности не представляет. Это, разумеется, не означает, что всякий контроль можно прекратить и ослабить внимание к процессу.

По результатам обработки экспериментальных данных многих охлаждений построены зависимости расхода хладагентов по времени. Такие графики удобны для практического осуществления процесса и сравнительно точно позволяют реализовать кривую, ранее представленную на рис. 5.

Эти графики /рис. 6/ позволяют также прогнозировать потребность в хладагентах с целью их своевременной доставки или производства на месте.

Отепление камеры, как правило, производится естественным путем. Ход естественного отепления представлен на рис. 7. Как в случае охлаждения, контроль осуществляется по температурам верхней и нижней плоскости стекла-иллюминатора. На графиках показаны усредненные по плоскостям температуры. Градиенты в плоскости стекла-иллюминатора не превышают градиенты, имеющие место по его толщине.

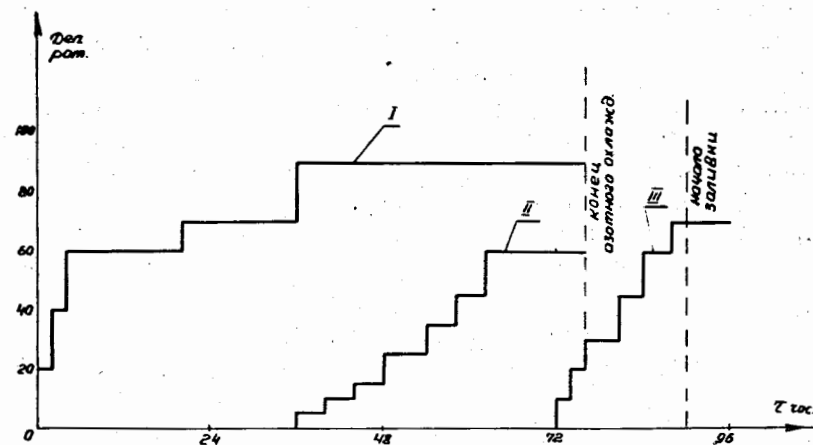


Рис. 6. Зависимость расхода охлаждающих жидкостей от времени охлаждения в делениях ротаметров. I - расход азота через донный теплообменник, II - расход азота через фланцевый теплообменник, III - расход водорода через водородный теплообменник.

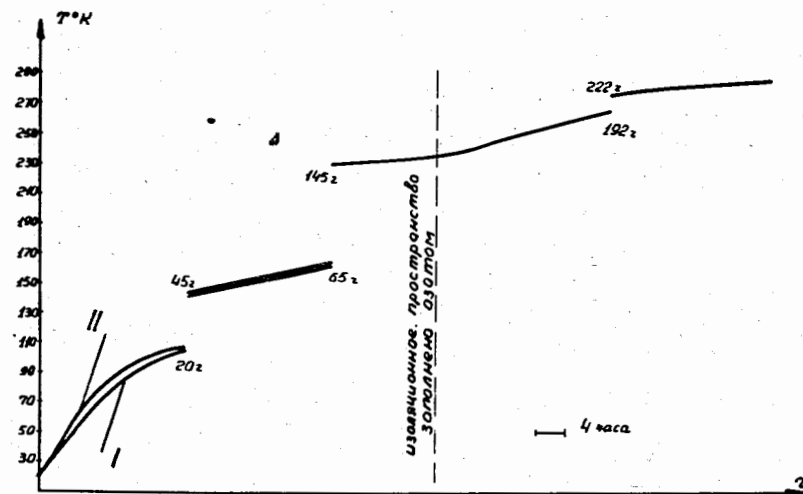


Рис. 7. Кривые нагревания стекла при естественном отеплении камеры. I - температура нижней плоскости стекла, II - температура верхней плоскости стекла.

При эксплуатации камеры возможны ситуации, которые требуют ускоренного отепления. В одном из сеансов такое отепление производилось. Для нагревания использовался газообразный азот, а затем сжатый воздух, которые пропускались по азотным теплообменникам. Полное время отепления при этом составило 2,5 суток. Осуществление такого отепления требует повышенного внимания и частого вмешательства персонала.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная система охлаждения позволяет осуществлять процесс с заданной скоростью и допустимыми градиентами как по толщине, так и в плоскости стеклаллюминатора.

Система проста по конструкции и технологична. Управление процессом несложно и осуществляется минимальным числом регулирующих органов. Система не оказывает отрицательного влияния на работу других узлов и систем камеры, на ее основные характеристики, определяющие качество данного физического прибора.

Система контроля дает необходимую информацию о процессе охлаждения, проста в обслуживании и достаточно надежна.

Проведенные сеансы подтвердили правильность исходных предпосылок и целесообразность избранной системы охлаждения.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам отдела водородных камер ЛВЭ и других подразделений, принимавшим на разных этапах участие в изготовлении, монтаже и испытаниях системы. Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность сотрудникам криогенного отдела ЛВЭ, чей положительный опыт эксплуатации 100-сантиметровой жидководородной пузырьковой камеры был использован.

Литература

1. *Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения.* Под ред. М.П.Малкова. Энергоиздат, М., 1963.
2. И.В.Богуславский и др. ОИЯИ, 13-6178, Дубна, 1971.
3. А.Г.Зельдович, Ю.К.Пилипенко. Ожижитель водорода ВО-2, предназначенный для обслуживания больших жидководородных камер. ПТЭ, №5, 1964.

*Рукопись поступила в издательский отдел
28 декабря 1973 года.*