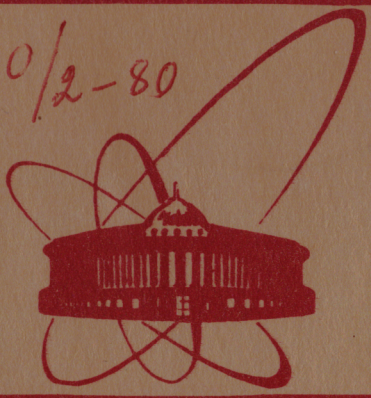


5000/2-80



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

20/x-80

P8-80-482

В.Н.Павлов

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК
ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО
РЕФРИЖЕРАТОРА РАСТВОРЕНИЯ

Направлено в журнал "Cryogenics"
и на 21 Всесоюзное совещание по физике
низких температур, Харьков

1980

Павлов В.Н.

P8-80-482

Низкотемпературный теплообменник
для комбинированного рефрижератора растворения

Описывается конструкция и технология изготовления низкотемпературного ступенчатого теплообменника из спекшего медного порошка. Сообщаются результаты его использования в комбинированном рефрижераторе растворения. Сделан теоретический анализ работы камеры растворения в разовом режиме. Получены две формулы, правильно описывающие этот процесс как для случая реальной камеры растворения, так и для адиабатического растворения ^3He до равновесной концентрации 6,4%.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1980

Pavlov V.N.

P8-80-482

Low-Temperature Heat-Exchanger for Combined
Dilution Refrigerator

The design and techniques for constructing a step-

ВВЕДЕНИЕ

Минимальная температура в камере растворения рефрижератора $^3\text{He} - ^4\text{He}$ определяется эффективностью системы используемых в нем теплообменников. Теплообмен между встречными потоками жидких фаз ^3He в ^4He , осуществляемый через разделяющую их твердую стенку, затруднен существованием температурного скачка Капицы на каждой из границ раздела жидкость-стенка, определяемого как $\Delta T = R_k \frac{\dot{Q}}{ST^3}$, где R_k - удельное сопротивление Капицы, \dot{Q} - величина теплового потока, передаваемого через границу раздела площадью S , а T - абсолютная температура теплообменной стенки. Очевидно, что уменьшения разности температур жидких фаз гелия в теплообменниках можно достичь путем увеличения площади теплообменной стенки. Увеличить эффективную поверхность теплообменной стенки можно либо дроблением ее на тонкие полоски профилированной фольги ^{1,2/}, либо припеканием к ней губки из мелкодисперсного медного или серебряного порошка ^{3,4/}.

К настоящему времени полностью выявились преимущества и перспективность технологии спекания ступенчатых теплообменников из порошковых металлов. Главное достоинство таких теплообменников заключается в том, что в них можно легко достичь малого импеданса ^{5/} и очень большой эффективной поверхности теплообмена ^{6/}.

Опыт эксплуатации перспективной конструкции комбинированного рефрижератора растворения ^{7/} выявил недостаточную надежность его низкотемпературного теплообменника и стимулировал разработку нового.

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКА

Если теплообменник Нииникоски ^{5/} занимает по своей конструкции как бы промежуточное положение между теплообменниками непрерывного и ступенчатого типа, то в предлагаемой конструкции сделан дальнейший шаг в направлении сочетания в спеченном блоке большой поверхности теплообмена с низким импедансом для потока жидких фаз ^3He в ^4He .

Основным элементом такого теплообменника /рис.1/ является цилиндрическая теплообменная стенка 1 из бескислородной меди,

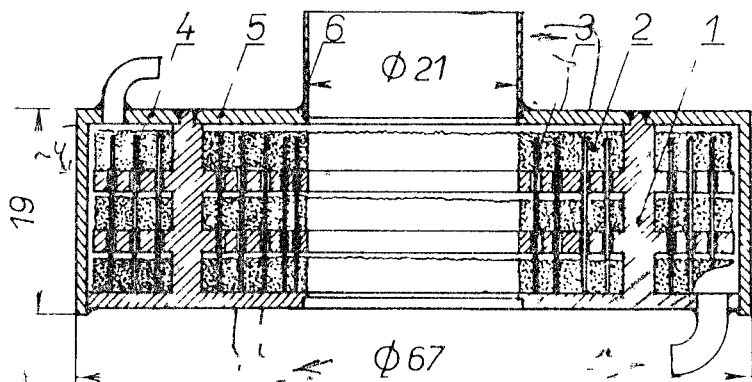


Рис. 1. Конструкция ступени низкотемпературного теплообменника. 1 - теплообменная стенка; 2 - медный порошок; 3 - медные проволочки; 4 - цилиндр; 5 - крышка; 6 - переходная трубка.

имеющая радиальные ребра по наружной и внутренней стороне. Межреберные промежутки заполнены медным порошком 2, припеченным к теплообменной стенке 1. Полученный теплообменный блок закрыт снаружи медным цилиндром 4 и крышкой 5 и герметизирован твердой или мягкой пайкой в вакууме. Внутри блока оставлено сквозное отверстие, через которое впоследствии, после сборки всей системы теплообменников, проходит тепловая пробка. Кольцевой канал для прохода концентрированной фазы ^3He задается размерами графитовой формы, в которой проходит спекание теплообменного блока. Ввиду того, что конструкция теплообменника не позволяет проводить желательную подпрессовку свободно насыпанного медного порошка, а тепловой контакт спеченной губки с теплообменной стенкой должен быть надежным, радиальные ребра теплообменной стенки имеют множество малых отверстий, в которые перед засыпкой медного порошка вкладываются короткие отрезки медных проволочек 3. При спекании происходит значительная усадка порошка, в результате которой появляются радиальные щели между нижними плоскостями ребер и просевшей спеченной губкой. Сеть проволочек 3 осуществляет передачу фононов из глубинных слоев спеченного порошка к ближайшему элементу радиального ребра теплообменной стенки. Следует заметить, что свойство порошка сильно усаживаться при спекании положительно проявляется в данной конструкции в том, что об-

разующиеся щели представляют собой, по-существу, систему для стока фононов в скользящий мимо теплообменного блока поток ^3He , выполняя ту же функцию, что и радиальные ребра теплообменной стенки. Таким образом получается, что радиальная глубина спеченной губки не должна сказываться на выходе фононов в обтекающий поток гелия и, следовательно, для набора желаемой эффективной поверхности теплообмена радиальные размеры теплообменника можно увеличивать.

В связи с существенным расхождением технологии спекания, описанной в разных работах [2,8], была проведена предварительная отработка оптимального процесса спекания для неуплотненного слоя медного порошка. При этом варьировались такие условия процесса, как температура, продолжительность и атмосфера. Температура изменялась от 700 до 900°C, продолжительность от одного до шести часов. Спекание производилось в вакууме, в среде ультрачистого водорода и при их чередовании.

Критерием качества спекания образцов служили объемная усадка порошка, цвет поверхности, механическая прочность сцепления отдельных зерен друг с другом и с плоской поверхностью, критический радиус изгиба миллиметрового слоя порошка, припеченного к медной пластине.

Наилучшие результаты дал процесс спекания, проведенный в течение 3 ч при температуре 850°C с предварительной очисткой спекаемых поверхностей чистым водородом. Очистка проводилась при $t = 650^\circ\text{C}$ путем многократного напуска водорода в вакуумный контейнер печи до давления в десятки Торр и последующей откачки до высокого вакуума. Стадия очистки занимала около 1/2 ч, затем шло спекание при $P < 10^{-5}$ Торр. В конце процесса спекания в контейнер подавался водород, и печь остывала до $t < 100^\circ\text{C}$.

Образцы из спекшегося сферического медного порошка со средним диаметром около 30 мкм имели усадку около 5%. Критический радиус изгиба, при котором появлялись трещины в верхнем слое порошка, был менее 10 мм. Удельный импеданс спеченной губки составил $2,02 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Отдельные зерна порошка были прочно сварены друг с другом и с поверхностью подложки и имели зеркально чистую поверхность. Коэффициент заполнения составил 71%.

Испытания системы теплообменников проведены в течение года на двух вариантах новой модели комбинированного рефрижератора растворения. Для их создания был использован, как основа, уже работавший рефрижератор [7], в котором непрерывный теплообменник сильфонного типа был заменен ступенчатой системой из описанных выше блоков. В первом варианте система содержала три блока и старую камеру растворения, а во втором - четыре блока и новую камеру растворения вдвое меньшего объема /50 см³/.



Рис. 2: Комбинированный рефрижератор растворения с 4-ступенчатым теплообменником.

Кроме того, в новой модели установлен трубчатый теплообменник, аналогичный по конструкции прежнему, но с импедансом на разбавленной стороне, меньшим на порядок, чем у предшествующего. Основной и единственный дроссель имеет импеданс $4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-8}$ и стоит на выходе теплообменника ниже камеры испарения. Общий вид второго варианта модернизированной модели рефрижератора представлен на рис. 2.

Все изменения сказались существенным образом на работе рефрижератора. Время выхода на температуру в 11 мК составило 3 ч в первоначальном цикле охлаждения и около 2 ч во втором цикле. Минимальная температура на экспериментальном образце достигла 10,4 мК при $\dot{n}_3 = 3 \cdot 10^{-4}$ моль/с. Полезная холодопроизводительность рефрижераторов представлена на рис. 3. Этот рисунок наглядно отражает явное преимущество последней модели рефрижератора с 4-ступенчатым теплообменником перед своей предшествующей моделью, а также перед некоторыми известными аналогами.

Описанный теплообменник является простой, технологичной и надежной конструкцией, удобной для применения не только в комбинированном рефрижераторе растворения, но и в любом другом с центральным вводом экспериментального образца.

Следует отметить один важный аспект, касающийся влияния гравитационной неустойчивости фаз ^3He в ^4He на работу рефрижератора растворения. Этому вопросу придавалось важное значение [2,9]. Модернизированный вариант комбинированного рефрижератора растворения является объектом, в котором это явление должно было бы проявиться наиболее явно. Во-первых, потому, что в нем отсутствует диафрагма, уменьшающая разбавление циркулирующей смеси за счет пленки ^3He . Во-вторых, потому, что его система теплообменников является противоточной на всей длине и имеет весьма широкий кольцевой канал для разбавленного раствора /от 2 мм в нижнем теплообменнике до 1 мм в верхнем/. Несмотря на столь благоприятные условия, никаких неустойчивостей в работе рефрижератора не наблюдалось. По-видимому, гравитационная неустойчивость должна проявляться либо при малых скоростях циркуляции, либо иметь место на участке второй половины длины

$Q, \text{ Эрг/с}$

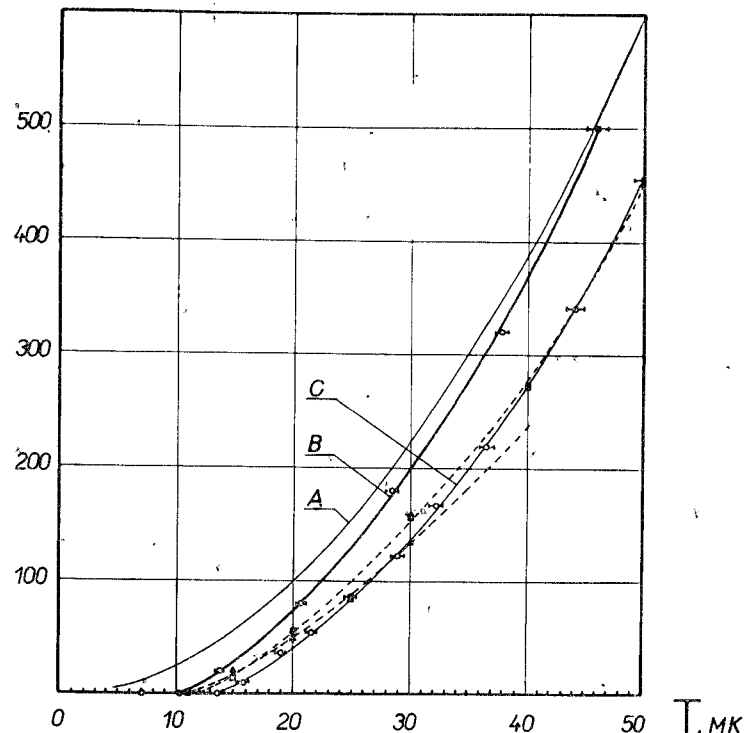


Рис. 3. Сравнительная холодопроизводительность различных рефрижераторов растворения, приведенная к единой скорости циркуляции $\dot{n}_3 = 3 \cdot 10^{-4}$ моль/с. А - теоретическая зависимость; В - комбинированный рефрижератор растворения с 4-ступенчатым теплообменником /данная работа/; С - комбинированный рефрижератор растворения с 3-ступенчатым теплообменником /данная работа/; Δ - рефрижератор Энхольма [10]; \square - коммерческий рефрижератор DRP-36 фирмы S.H.E.

предварительного трубчатого теплообменника при температурах порядка 0,1 К.

АНАЛИЗ РАБОТЫ КАМЕРЫ РАСТВОРЕНИЯ В РАЗОВОМ РЕЖИМЕ

Минимальная температура, получаемая в разовом режиме работы, для рефрижератора с большой камерой растворения оказалась равной 7 мК, а с малой камерой - 8 мК.

В связи с этим результатом представляет интерес провести более детальный анализ работы камеры растворения в разовом режиме, чем это было сделано раньше /1,3,11,12/.

Будем для простоты считать, что вся холодопроизводительность процесса растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ затрачивается на охлаждение только той жидкости, которая находится в камере растворения. Примем, что в начальный момент времени $t = 0$ в камере содержится M_0 молей концентрированной фазы ${}^3\text{He}$ и N_0 молей разбавленной, охлажденных в непрерывном режиме работы до стартовой температуры T_0 .

При откачке \dot{n}_3 молей чистого ${}^3\text{He}$ в единицу времени в камере растворения развивается холодопроизводительность

$$\dot{Q} = \dot{n}_3 (\alpha - \beta) T^2(t). \quad /1/$$

где $\alpha = 108$ Дж/моль·К² и $\beta = 24$ Дж/моль·К² - коэффициенты температурной зависимости молярной теплоемкости разбавленной и концентрированной фаз соответственно, а $T(t)$ - равновесная температура камеры в рассматриваемый момент времени t . По мере откачки ${}^3\text{He}$ количество концентрированной фазы будет уменьшаться по закону $M = M_0 - \dot{n}_3 t$, а количество разбавленной фазы возрастет по тому же закону $N = N_0 + \dot{\gamma} t$, где $\dot{\gamma} = \dot{n}_3 \frac{V_{3c}}{V_{3d}}$, а V_{3c} и V_{3d} - молярные объемы концентрированной и разбавленной фаз соответственно, определяемые из выражения $V = V_4 / X + 7,6 + 1,65 X^{2,12}$, в котором V_4 - молярный объем чистого ${}^4\text{He}$, а X - концентрация ${}^3\text{He}$.

Будем считать, что часть холодопроизводительности затрачивается на компенсацию внешнего теплопритока \dot{q} , а оставшаяся часть уходит на понижение температуры обеих фаз ${}^3\text{He}$ на величину dT . Таким образом, для dT можно написать уравнение

$$dT = - \frac{\dot{Q} - \dot{q}}{C(T, t)} dt, \quad /2/$$

где $C(T, t)$ - полная теплоемкость обеих фаз гелия в объеме камеры растворения. Для момента времени t для полной теплоемкости можно написать, что

$$C(T, t) = \beta T (M_0 - \dot{n}_3 t) + \alpha T (N_0 + \dot{\gamma} t). \quad /3/$$

Подставляя /1/ и /3/ в /2/ и интегрируя, получаем формулу

$$\left[\frac{\dot{n}_3 (\alpha - \beta) T^2 - \dot{q}}{\dot{n}_3 (\alpha - \beta) T_0^2 - \dot{q}} \right]^{\frac{\beta - \alpha V_{3c} / V_{3d}}{2(\alpha - \beta)}} = 1 - \frac{(\beta - \alpha V_{3c} / V_{3d}) \dot{n}_3 t}{\beta M_0 + \alpha N_0}, \quad /4/$$

которая отличается от аналогичного выражения работ /1,3,11,12/ тем, что учитывает влияние начального фазового состава жидкости и его динамическое изменение в камере растворения.

Частичная подстановка числовых значений α , β , V_{3c} и V_{3d} приводит к уравнению

$$\left[\frac{\dot{n}_3 (\alpha - \beta) T^2 - \dot{q}}{\dot{n}_3 (\alpha - \beta) T_0^2 - \dot{q}} \right]^{0,089} = 1 - \frac{0,6225 \dot{n}_3 t}{M_0 (1 + 4,5 N_0 / M_0)}. \quad /5/$$

Полученная формула /5/ представляет собой временную зависимость относительной холодопроизводительности, затрачиваемой на охлаждение камеры растворения, и справедлива при условии, что $T_0 < 40$ мК. Из уравнения /5/ видно, что обе его части всегда положительны. Это означает, что в любой момент времени холодопроизводительность процесса растворения ${}^3\text{He}$ превосходит внешний теплоприток \dot{q} .

Из формулы /5/ видно, что конечная температура зависит также от начального фазового состава жидкости в камере растворения и скорости растворения \dot{n}_3 . Для получения более низкой конечной температуры нужно стремиться к увеличению \dot{n}_3 , а также к уменьшению стартовой температуры T_0 , уменьшению начального количества разбавленной фазы N_0 и, главным образом, к уменьшению внешнего теплопритока \dot{q} . Если бы внешний теплоприток \dot{q} был равен нулю и весь объем камеры растворения в начальный момент времени был заполнен чистым ${}^3\text{He}$, то, согласно уравнению /5/ для T , достигаемой в момент $t_0 = M_0 / \dot{n}_3$, получаем $4,2 \cdot 10^{-3} T_0$.

Таким образом, даже в отсутствие внешней тепловой нагрузки \dot{q} конечная температура не равна нулю. Теоретически в идеально изолированной камере растворения, охлажденной предварительно до $T_0 = 0,01$ К, можно было бы достичь $T \approx 5 \cdot 10^{-5}$ К, чему в реальном случае, безусловно, мешает внешний теплоприток и вязкостный нагрев разбавленной фазы ${}^3\text{He}$.

Для процесса адиабатического растворения ${}^3\text{He}$ до равновесной концентрации $X_d = 6,4\%$, полагая $\dot{\gamma} = \dot{n}_3$, получим формулу

$$\frac{\dot{n}_3 (\alpha - \beta) T^2 - \dot{q}}{\dot{n}_3 (\alpha - \beta) T_0^2 - \dot{q}} = \left[1 + \frac{(\alpha - \beta) \dot{n}_3 t}{\beta M_0 + \alpha N_0} \right]^{-2}, \quad /6/$$

описывающую изменение температуры со временем в гипотетической камере по модели Витли и др. /3/. На рис. 4 представлен расчет относительного изменения температуры в камере растворения со временем для различных начальных условий. Обращает на себя внимание преимущество реальной камеры перед гипотетической. Согласно уравнению /6/ и рис. 4, при адиабатическом растворении ${}^3\text{He}$ $T_{\min} = 0,22 T_0$, что совпадает с результатом работы /13/. Из рис. 4 видно, что для высоких внешних тепловых нагрузок участок

практически стабильной температуры может занимать значительную часть общей продолжительности разового режима. Таким образом, камера растворения большого объема может обеспечить на определенное время стабильную температуру более низкую, чем получаемую в режиме циркуляции ^3He .

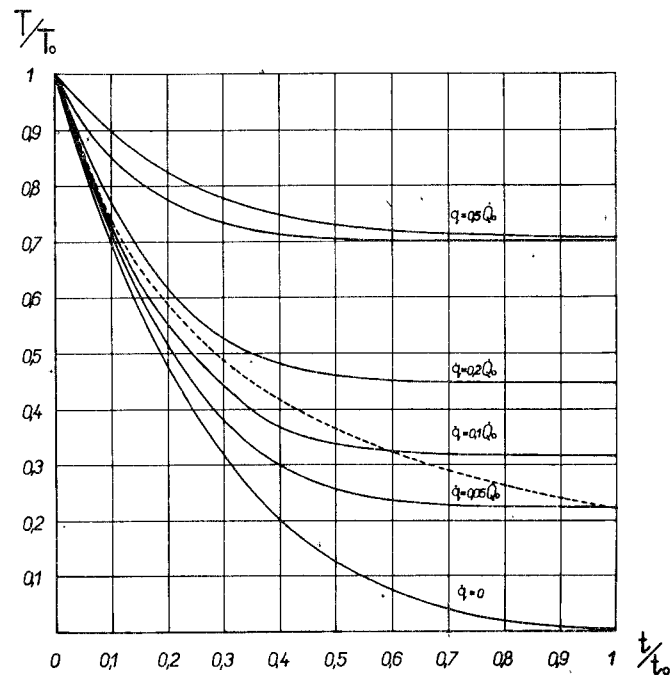


Рис.4. Зависимость температуры в камере растворения в разовом режиме работы от времени откачки ^3He . Сплошные линии рассчитаны по формуле /5/ для различных внешних тепловых нагрузок, составляющих некоторую часть от стартовой холодопроизводительности Q_0 в предположении $N_0=0$, кроме верхней, для которой принято $N_0=0,1$. Пунктирная кривая рассчитана по формуле /6/ для случая $q=0$ и $N_0=0$.

В результате проведенного анализа становится ясно, что минимальная температура камеры растворения, доступная в разовом режиме работы, определяется прежде всего величиной внешнего теплопритока и поэтому мало отличается от минимальной температуры камеры в режиме непрерывной циркуляции ^3He .

Эксплуатация комбинированного рефрижератора растворения выявила одну его полезную особенность, а именно: кольцевой зазор вдоль тепловой пробки в пределах, по крайней мере, до 0,03 мм, не влияет на работу рефрижератора.

В заключение автор считает своим долгом выразить благодарность Б.С.Неганову за полезную дискуссию, М.Фингеру за постоянный интерес к работе, Я.Дупаку и И.З.Крахинову за помощь в изготовлении теплообменников и проведении измерений, а также сотрудникам, содействовавшим выполнению этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неганов Б.С. ОИЯИ, P13-4014, Дубна, 1968.
2. Wheatley J.C., Rapp R.E., Johnson R.T. J.Low Temp.Phys., 1971, 4, p.1.
3. Wheatley J.C., Vilches O.E., Abel W.R. Physics, 1968,4,p.1.
4. Radebaugh R. et al. Proc. ICEC 5 Kyoto, 1974, p.235.
5. Niinikoski T.O. Nucl.Instr.& Meth., 1971, 97, p.95.
6. Frossati G. Journ. de Phys., Colloque C-6, Suppl. au No.8, Tome 39, Août 1978, C6-1578.
7. Pavlov V.N. et al. Cryogenics, 1978, 2, p.115.
8. Ehnholm G.J., Soini J.K. Proc. LT14 Otaaniemi, 1975,4, p.21.
9. Hall H.E., Ford P.J., Thompson K. Cryogenics, 1966, 6,p.80.
10. Ehnholm G.J., Gylling R.G. Cryogenics, 1971, 11, p.39.
11. Vilches O.E., Wheatley J.C. Phys.Lett., 1967, 24A, p.440.
12. Radebaugh R. NBS Technical Note, 1967, 362.
13. Edwards D.O. Proc. 1970 Ultralow Temp.Symp. U.S.Naval Research Laboratory Rep. No. 7133, Washington, D.C., 1970, p.27.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 июля 1980 года.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники

Нет ли пробелов в Вашей библиотеке?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д1,2-8405	Труды IV Международного симпозиума по физике высоких энергий и элементарных частиц. Варна, 1974.	2 р. 05 к.
P1,2-8529	Труды Международной школы-семинара молодых ученых. Актуальные проблемы физики элементарных частиц. Сочи, 1974.	2 р. 60 к.
Д6-8846	XIV совещание по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1975.	1 р. 90 к.
Д13-9164	Международное совещание по методике проволочных камер. Дубна, 1975.	4 р. 20 к.
Д1,2-9224	IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1975.	3 р. 60 к.
Д-9920	Труды Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1976.	3 р. 50 к.
Д9-10500	Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна, 1976.	2 р. 50 к.
Д2-10533	Труды X Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Баку, 1976.	3 р. 50 к.
Д13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
Д17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
Д6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды У1 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна 1978. /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна 1978.	5 р. 00 к.
P18-12147	Труды III совещания по использованию ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач.	2 р. 20 к.

Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
P2-12462	Труды V Международного совещания по нелокальным теориям поля. Алушта, 1979.	2 р. 25 к.
Д-12831	Труды Международного симпозиума по фундаментальным проблемам теоретической и математической физики. Дубна, 1979.	4 р. 00 к.
Д-12965	Труды Международной школы молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. Минск, 1979.	3 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1979.	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:

101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79,

издательский отдел Объединенного института ядерных исследований