

объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна

P8-85-896

В.Д.Бартенев, В.И.Дацков, А.Г.Зельдович,  
Ю.А.Шишов

О СОХРАНЕНИИ РАССЛОЕНИЯ ГЕЛИЯ  
В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ  
ПРИ НЕАДИАБАТНЫХ УСЛОВИЯХ

Направлено в журнал "Письма в ЖЭТФ"

1985

## ВВЕДЕНИЕ

С целью исследования процессов при авариях гелиевых сосудов был создан вертикальный криостат с иллимнатором. В одном из экспериментов проводилось измерение при переходе гелия в сверхкритическое состояние. При этом визуально обнаружено сохранение поверхности раздела, существовавшей между жидким и газообразным гелием в докритическом состоянии. В дальнейшем это явление наблюдали при более высоких параметрах температуры  $T$  и давления  $P$  вплоть до  $8,3\text{ К}$  при  $1,18\text{ МПа}$ . /Для гелия  $T_{кр.} = 5,201\text{ К}$ ,  $P_{кр.} = 0,2275\text{ МПа}$ /. Исследования велись в неадиабатных условиях при значительном теплопритоке /до  $4,7\text{ Вт}$ / сверху по стенке криостата, столбу газообразного гелия и лучеиспусканием.

## 1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Установка /рис. 1/ включает в себя криостат дельтарного типа с внутренним диаметром  $200$  и высотой  $625\text{ мм}$ , изготовленный из нержавеющей стали и снабженный прозрачной крышкой толщиной  $10\text{ мм}$  из поликарбоната. Криостат теплоизолирован вакуумной многослойной изоляцией без азотного экрана.

Температура гелия измерялась с помощью десяти термометров сопротивления, изготовленных на основе композиционных резисторов типа ТВО-0,125 /номинал  $1\text{ кОм}$ /, градуированных в диапазоне  $4-300\text{ К}$  с точностью  $0,2\%$   $^{1/I}$ . Установлено, что при температуре жидкого гелия погрешность показаний термометров ТВО от давления в пределах  $0,1-3\text{ МПа}$  не превышает  $0,015\text{ К}$ . Сигналы с датчиков с помощью аналогового мультиплексора передавались на цифровой вольтметр класса  $0,05$ . Сигналы

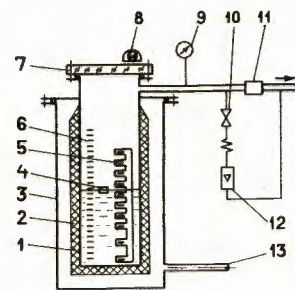


Рис. 1. Экспериментальный криостат:  
1 - внутренний сосуд с жидким гелием;  
2 - многослойная экрано-вакуумная теплоизоляция; 3 - вакуумный кожух;  
4 - нагреватель; 5 - стойка с 10 термометрами ТВО; 6 - шкала высоты на стенке сосуда; 7 - окно из поликарбоната; 8 - осветительная лампа; 9 - манометр; 10 - вентиль; 11 - предохранительный клапан; 12 - ротаметр; 13 - труба к вакуумному насосу.

с цифрового вольтметра, блока реального времени и блока позиций мультиплексора поступали на цифropечать, позволявшую регистрировать до 3 измерений в секунду. Положение поверхности раздела в гелии определялось визуально с точностью  $\pm 1\text{ см}$  по нанесенной на стенке криостата шкале. Избыточное давление в криостате измерялось с помощью манометров класса  $0,6-1,0$  со шкалами I-I,6; 0-4; 0-16 ат. техн. Расход выходящего из криостата гелия измерялся ротаметрами РС-3 и РС-5 с точностью  $\pm 5\%$ . Изоляционный вакуум поддерживался на уровне  $10^2\text{ Па}$ .

## 3. ХОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В криостат наливалось около  $20\text{ см}$  жидкого гелия /6 л/. Для проверки термометрии измерялись показания термометров при открытом выходе газа из криостата в газгольдер. Закрывался выход газа. Теплоприток из окружающей среды приводил к росту давления и температуры. Заданную величину давления стабилизировали выпуском газа через вентиль 10 /рис. 1/ с точностью  $\pm 0,002 + 0,005\text{ МПа}$ . Велись непрерывные наблюдения за поверхностью раздела и автоматическая запись температур.

Расчет и измерения показывают, что основной теплоприток /до  $4,7\text{ Вт}$ / идет сверху вниз за счет теплопроводности стенок криостата и газообразного гелия, а также лучеиспусканием.

При переходе в сверхкритическую область внешний вид поверхности раздела не изменялся: на ней были видны световые блики, на границе со стенкой криостата наблюдалась тонкая светлая полоска, при механическом возмущении возникали волны. Ниже поверхности раздела температура гелия не зависела от высоты, выше поверхности раздела существовал резкий градиент температуры /рис. 2/.

В предварительных опытах на поверхности раздела плавали пенопластовые поплавки. Колебание поверхности вызывало на ней волны и

колебание поплавков. Включение нагревателя под поверхностью при сверхкритических температурах давало восходящий поток более теплого и менее плотного гелия, образующего на поверхности хорошо видимый бугор, с которого поплавок сползали к периферии. Гелий под поверхностью раздела зачерпывался ведерком с отверстиями диаметром 2 мм возле дна. Когда ведерко вытаскивалось выше поверхности раздела, из отверстий вытекали ясно видимые струйки более плотного гелия.

Высота поверхности раздела определялась балансом между оттоком газа из кристата и уменьшением плотности гелия вследствие повышения температуры /рис. 3/. При экспериментах с давлениями 0,2-0,5 МПа уровень поверхности повышался по мере роста температуры. При более высоких давлениях уровень не менялся.

В основной серии опытов момент исчезновения поверхности раздела слоев определялся визуально. Наблюдение облегчалось качанием вертикальной сплюсненной трубки - "весла", вызывавшей колебания поверхности. По мере увеличения температуры гелия визуальные признаки существования поверхности раздела становились менее различимы и, наконец, она переставала быть видимой. Результаты измерений приведены на рис. 4 и в таблице. При исчезновении поверхности раздела самопроизвольно увеличивался расход газа по ротаметру и снижались показания верхних термометров /см. рис. 2/. Попытки восстановить исчезнувшую поверхность раздела путем повышения давления, сопровождавшегося ростом температуры, положительного результата не дали.

В сверхкритической области слой гелия над поверхностью при помешивании становился оптически неоднородным, сиропообразным. После исчезновения поверхности раздела так выглядел весь гелий. Визуально можно было определить верхнюю границу оптически неоднородного гелия, которая составляла в наших опытах 40-45 см.

Сохранение высокой температурной однородности гелия под поверхностью раздела можно объяснить следующим образом. Основной теплопоток, направленный сверху вниз, поглощается поверхностным слоем гелия, обладающим в этих условиях высокой теплоемкостью /см. рис. 3/. Это видно, в частности, в контрольных опытах с докритическим гелием. При давлениях 0,208 и 0,218 МПа температура столба жидкого гелия под поверхностной пленкой оказалась на 0,13+0,15 К ниже равновесной, найденной по таблице /2/. При измерении температуры гелия температурным щупом в хорошо теплоизолированном транспортном сосуде с жидким гелием наблюдался перегрев жидкого гелия от значения 4,20 К на уровне 10 мм и ниже под поверхностью до 4,39 К на поверхности. По-видимому, поверхностный слой жидкости оказывается в температурном равновесии с прилегающим слоем газа и теплее основной массы жидкости.

Таблица Температура под поверхностью раздела в момент исчезновения поверхности при заданном давлении

Температура, К	5,14	5,25	5,38	5,41	5,43	5,41	5,72	5,66	5,26	5,40	5,59	5,84
Давление, МПа	0,237	0,237	0,237	0,276	0,295	0,305	0,325	0,345	0,393	0,393	0,393	0,393
Температура, К	6,22	6,10	6,12	6,46	6,73	6,62	6,79	6,93	7,15	7,24	7,44	6,59
Давление, МПа	0,443	0,493	0,493	0,540	0,638	0,687	0,737	0,785	0,785	0,785	0,835	0,885
Температура, К	6,76	7,80	6,99	7,88	8,20	8,28	8,28	7,31	7,96			
Давление, МПа	0,885	0,934	0,981	0,981	1,08	1,08	1,13	1,18	1,18			

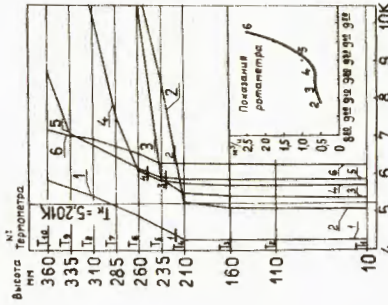


Рис. 2. Распределение температур и показания ротаметра в эксперименте при 0,383 МПа:  
 1 - время 8-58, кипение при 0,102 МПа /газольдерное давление/; 2 - 9-07; 3 - 9-15; 4 - 9-26; 5 - 9-33 - исчезновение поверхности раздела; 6 - 9-49 - поверхность раздела отсутствует. Короткие горизонтальные линии - визуальная высота поверхности раздела в соответствующий момент.

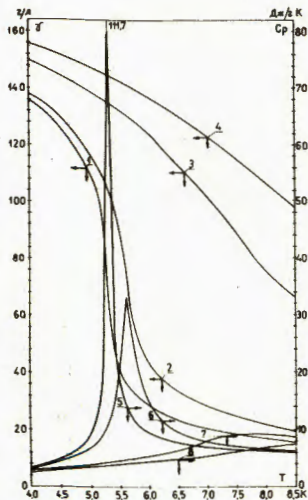


Рис. 3. Зависимость теплоемкости  $C_p$  и плотности  $\rho$  от температуры и давления по [2]: 1 и 5 при 0,243 МПа; 2 и 6 при 0,304 МПа; 3 и 7 при 0,811 МПа; 4 и 8 при 1,22 МПа.

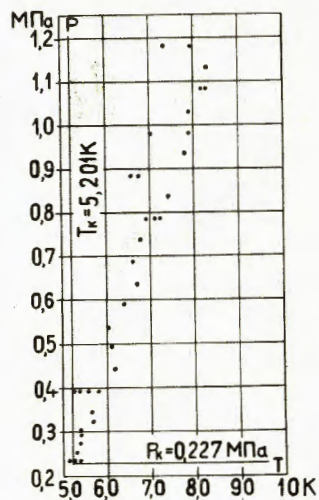


Рис. 4. Температура под поверхностью раздела в момент исчезновения поверхности при заданном давлении.

Нам не удалось измерить поверхностное натяжение поверхности раздела и у нас нет прямых доказательств того, что она подобна обычной поверхностной пленке жидкости. Однако определенное сходство с обычной поверхностью раздела между жидкостью и газом имеется. При значительном теплопритоке сверху вниз создаются большие градиенты температуры и, соответственно, плотности гелия у поверхности, как это имеет место в случае жидкости и газа. Видимо, можно говорить о поддержании упорядоченной структуры /поверхностной пленки/ в неравновесных условиях.

Параметры других веществ в сверхкритической области схожи с таковыми для гелия, и есть вероятность, что у них будут наблюдаться такие же явления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дацков В.И. ПТЭ, 1981, № 4, с. 253.
2. Mc. Karty K.D. Thermophysical Properties of Helium-4 from 2 to 1500 K with Pressures to 1000 Atmospheres. NBS Technical Note 631, 1972, U.S. Department of Commerce.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 декабря 1985 года.

Бартенев В.Д. и др.

P8-85-896

О сохранении расслоения гелия  
в сверхкритической области при неадиабатных условиях

При повышении давления и температуры гелия до сверхкритических величин визуально обнаружено в вертикальном криостате со значительным теплопритоком сверху сохранение поверхности раздела, существовавшей ранее между жидким и газообразным гелием. Исследована область существования поверхности до 1,18 МПа и 8,3 К.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Bartenev V.D. et al.

P8-85-896

About the Conservation of Helium Layer  
in the Supercritical Region under Nonadiabatic Conditions

At increasing the pressure and temperature of helium upto supercritical values in the vertical cryostat with a significant heat inflow from above the conservation of the surface of separation which had earlier existed between liquid and gaseous helium has been discovered visually. The region of existence of separation surface up to 1.18 MPa and 8.3 K is investigated.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985