

A-239

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



2360 / 2-77

20/VI-77

8 - 10477

А.И.Агеев, В.Ф.Буринов, Ю.В.Муратов,
В.И.Пряничников, Н.Б.Рубин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКИ ХГУ-250/4,5

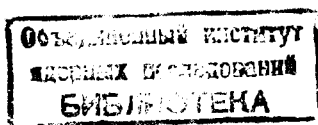
1977

8 - 10477

А.И.Агеев, В.Ф.Буринов, Ю.В.Муратов,
В.И.Пряничников, Н.Б.Рубин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКИ ХГУ-250/4,5

*Направлено в журнал "Химическое и нефтяное машино-
строение"*



Агеев А.И., Буринов В.Ф., Муратов Ю.В.,
Пряничников В.И., Рубин Н.Б.

8 - 10477

Экспериментальное исследование криогенной гелиевой
установки ХГУ-250/4,5

Приводятся результаты экспериментального исследования серийной криогенной гелиевой установки ХГУ-250/4,5, предназначенной как для производства жидкого гелия в количестве 90 л/ч, так и для криостатирования объектов с холодопроизводительностью 250 Вт.

Предложены и осуществлены режимы с предварительным азотным охлаждением, что позволило повысить холодопроизводительность до 340 и 470 Вт и темп охлаждения до 104 и 120 л/ч. При этом эффективность установки возросла в 1,2-1,3 раза. Проведенная модернизация установки позволила также осуществить комбинированные режимы в полном диапазоне регулирования.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Криогенная установка ХГУ-250/4,5 - первая в Советском Союзе гелиевая рефрижераторно-ожижительная установка, в которой применены турбодетандеры. Она предназначена для работы в двух режимах: ожижительном с темпом ожижения 3,1 г/с /90 л/ч жидкого гелия/ и рефрижераторном с холодопроизводительностью 250 Вт при температуре криостатирования 4,5 К^{1,2}. В схеме ХГУ-250/4,5 /рис. 1/ использовано последовательное включение турбодетандеров ТД1 и ТД2, применено двойное дросселирование в нерегулируемом дросселе НВ /дюза ϕ 1,8/ и регулируемом вентиле РВ. Ожижительный режим осуществляется с предварительным охлаждением жидким азотом, рефрижераторный - без азотного охлаждения.

Большая холодопроизводительность установки ХГУ-250/4,5 позволяет использовать ее для криостатирования крупных объектов, таких как ускоряющая секция коллективного ускорителя Объединенного института ядерных исследований^{7/}. В этом случае часть жидкого или газообразного гелия может отводиться на охлаждение тоководов или тепловых мостов, т.е. установка должна работать не в ожижительном режиме, а в некотором промежуточном, комбинированном^{3/}. Поэтому было проведено экспериментальное исследование установки ХГУ-250/4,5 при работе в различных режимах, в том числе и комбинированных, как при нормальном /паспортном/ расходе сжатого гелия /около 60 г/с/, так и при повышенном /~74 г/с/.

Перед экспериментами в сборник жидкого гелия был введен электронагреватель ЭН /рис. 1/, которым имитировалась тепловая нагрузка Q_R при температуре жидкого

гелия, установлены расходомерная шайба для измерения потока гелия, циркулирующего в установке, сверхпроводящий уровнемер ^{4/} для определения уровня жидкого гелия. Температура на входе и выходе гелия из второго турбодетандера, а также перед регулируемым вентилем измерялась угольными резисторами фирмы "Allen-Bradley", установленными непосредственно в потоке газа. Максимальная холодопроизводительность $Q_R^* = 245 \text{ Вт}$ получена в рефрижераторном режиме ($G_L = 0$) без предварительного азотного охлаждения. При снижении тепловой нагрузки Q_R установка переходила в комбинированный режим /характеристика 1, рис. 2/. Так, при холодопроизводительности $Q_R = 200 \text{ Вт}$ темп ожигения $G_L = 0,69 \text{ г/с}$. Необходимо отметить, что увеличение G_L приводило к снижению потока сжатого газа через всю установку. Это объясняется тем, что при увеличении G_L уменьшается расход обратного потока через теплообменники I, III ÷ VII /рис. 1/, вследствие чего повышается температура перед турбодетандером ТД1. Так как сопловый аппарат турбодетандеров нерегулируем, то повышение температуры вызывает снижение потока газа через турбодетандеры, а следовательно, и через установку в целом. И действительно, если в рефрижераторном режиме / $Q_R^* = 245 \text{ Вт}$ / расход газа составлял $G_{KM} = 56 \text{ г/с}$, то в ожигительном - $G_{KM} = 45 \text{ г/с}$. Поэтому максимальный темп ожигения составил только $G_L^* = 1,4 \text{ г/с} / 40 \text{ л/ч/}$.

Применение предварительного азотного охлаждения /характеристика 2, рис. 1/ в ожигительном режиме существенно снижает, по сравнению с характеристикой 1, температуру перед турбодетандером ТД1, что позволяет при расходе газа через установку $G_{KM} = 56 \text{ г/с}$, получить $G_L^* = 2,95 \text{ г/с} / 85 \text{ л/ч/}$. При переходе от ожигительного режима к комбинированному увеличивается расход обратного потока, температура перед турбодетандером ТД1 снижается, следовательно, расход газа через них увеличивается. В области $Q_R = 100 \text{ Вт}$ температура газа ТД1 и ТД2 настолько низка, а расход его так велик, что происходит нарушение режима работы турбодетандеров и, следовательно, всей установки в целом /рис. 2/. Таким образом, применение предварительного азотного охлаждения

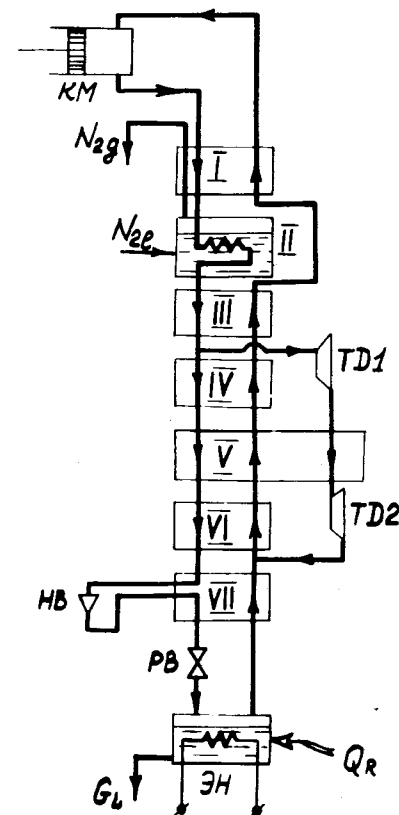


Рис. 1. Принципиальная схема установки ХГУ-250/4,5. I, III ÷ VII - теплообменные аппараты; II - ступень предварительного азотного охлаждения; KM - компрессор; ТД1 и ТД2 - турбодетандеры; NB - нерегулируемый дроссель /дюза/; PB - регулируемый дроссель; N_{2e} и N_{2g} - соответственно жидкий и газообразный азот; ЭН - электронагреватель.

позволяет получить высокий темп ожигения, но не дает возможности осуществить рефрижераторный и комбинированные режимы с $Q_R > 100 \text{ Вт}$. Для стабилизации режима необходимо увеличить расход газа через дроссель PB /рис. 1/, однако наличие дюзы NB диаметром 1,8 мм не позволяет произвести это перераспределение потоков.

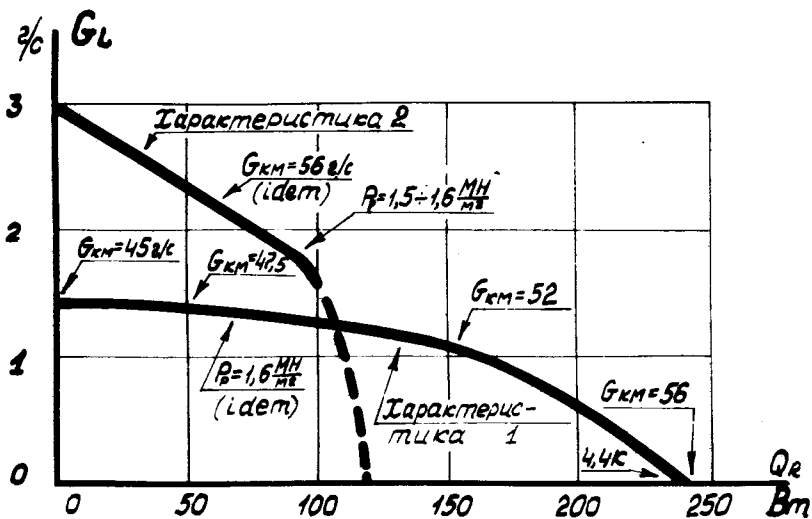


Рис. 2. Характеристики установки ХГУ-250/4,5 с дюзой $\phi 1,8$ мм. Характеристика 1 - режимы без предварительного азотного охлаждения; характеристика 2 - режимы с предварительным азотным охлаждением.

При двойном дросселировании /с $1,5 \text{ МН/м}^2$ до $0,6 \text{ МН/м}^2$ в дюзе НВ и с $0,6 \text{ МН/м}^2$ до $0,12 \text{ МН/м}^2$ в вентиле РВ/ для чисто рефрижераторного режима создаются благоприятные условия теплообмена в теплообменнике УП /рис. 1/, но, вследствие критического истечения потока через дюзу, исключается возможность полного регулирования установки в комбинированных режимах с предварительным азотным охлаждением. В ожигительном и в большинстве комбинированных режимов двойное дросселирование не улучшает показателей установки ХГУ-250/4,5. Расчеты также показали, что переход на докритический режим истечения потока в дюзе /что достигается увеличением ее диаметра до 3,5 мм/ не должен существенно повлиять на холодопроизводительность и в рефрижераторном режиме. Однако увеличение диаметра дюзы позволит с помощью вентиля РВ осуществить процесс оптимального перераспределения детандерного и дроссельного потоков.

Характеристика установки ХГУ-250/4,5 с дюзой $\phi 3,5$ мм в режиме без предварительного азотного охлаждения полностью совпадает с характеристикой 1 /рис. 2/, полученной с дюзой $\phi 1,8$ мм. Но с новой дюзой значительно улучшились показатели установки в режиме с предварительным азотным охлаждением /характеристика 3, рис. 3/. Отметим основные преимущества новых режимов.

1. Получено оптимальное сочетание детандерного и дроссельного потоков в ожигительном режиме. В результате темп ожигения увеличился с $2,95 \text{ з/с/}85 \text{ л/ч}$ до $3,6 \text{ з/с/}104 \text{ л/ч}$, т.е. более, чем в 1,2 раза.

2. Появилась возможность полного регулирования установки в комбинированных режимах, что позволило ликвидировать нестабильные режимы установки. Существенно улучшились показатели установки в комбинированных режимах. Если ранее /характеристика 2 рис. 2/ при $Q_R = 100 \text{ Вм}$ темп ожигения составлял $G_L = 1,74 \text{ з/с}$, то после расширения дюзы при $Q_R = 100 \text{ Вм}$ - $G_L = 2,66 \text{ з/с}$ /темп ожигения увеличился в 1,53 раза/.

3. В рефрижераторном режиме с предварительным азотным охлаждением получена величина $Q_R^* = 340 \text{ Вм}$, что в 1,36 раза больше паспортной. Такое повышение производительности произошло как вследствие выбора оптимального распределения потоков, так и вследствие того, что в этом режиме утечки газа по валу турбодетандеров ТД1 и ТД2 /рис. 1/ охлаждаются с помощью детандеров только с 80 К, а в режиме без предварительного азотного охлаждения необходимо было с помощью турбодетандеров охладить утечки газа с уровня окружающей среды.

Таким образом, по сравнению с паспортными данными диапазон применения установки ХГУ-250/4,5 для криостатирования крупных объектов значительно расширился.

Регулирование режимов по характеристике 3 /рис. 3/ производилось вентилем РВ /рис. 1/ при $G_{KM} = 56 \text{ з/с} = \text{idem}$. Например, при увеличении рефрижераторной мощности Q_R вентиль РВ приоткрывался, вследствие чего увеличивался расход дроссельного потока и снижалось давление газа на входе в установку от $p_p = 1,6 \text{ МН/м}^2$

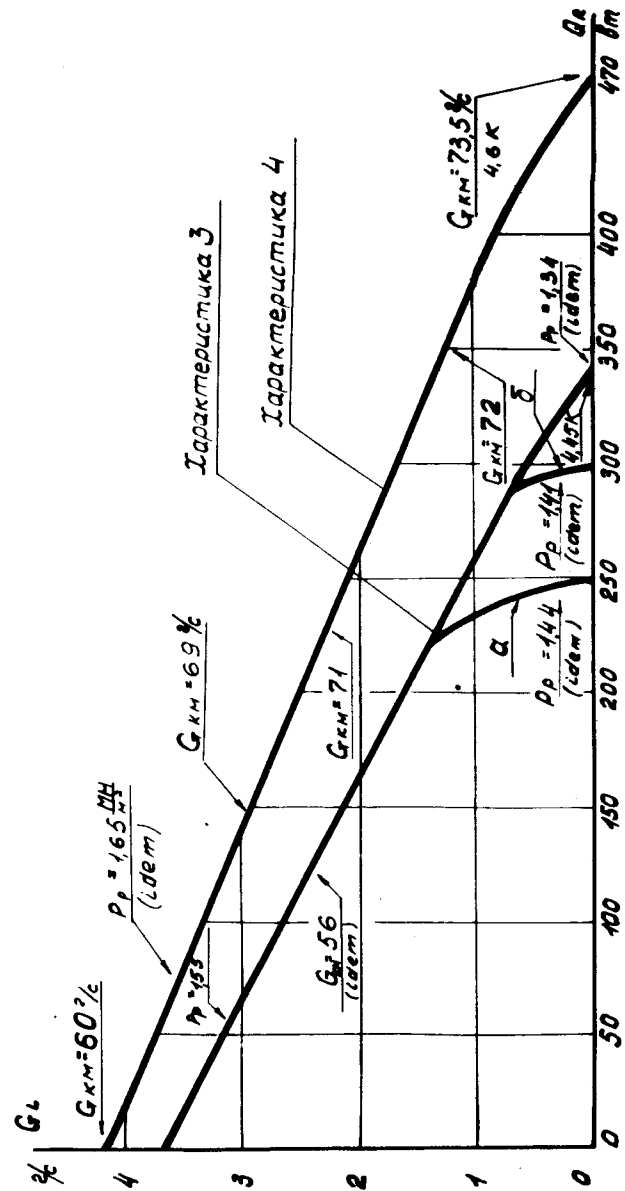


Рис. 3. Характеристики установки ХГУ-250/4,5 с дюзой ф 3,5 мм. Характеристика 3 - режимы с предварительным азотным охлаждением при постоянном расходе сжатого газа $G_{KM} = 56$ г/с и переменном давлении сжатого газа 1,34 1,55 МН/м²; характеристика 4 - режимы с предварительным азотным охлаждением при повышенном расходе сжатого газа $G_{KM} = 60 \div 73,5$ г/с.

/ожижительный режим/ до $p_p = 1,34$ МН/м²/рефрижераторный режим/, что приводило к уменьшению расхода детандерного потока. Если не производить регулирование давлением, то работа установки ухудшается. Так, при $p_p = 1,44$ МН/м² максимальная холодопроизводительность равна 250 Вт и при $p_p = 1,41$ МН/м² - 300 Вт /соответственно характеристики 3а и 3б, рис. 3/.

Предельное давление сжатого гелия, определяемое конструктивными особенностями ХГУ-250/4,5, составляет 1,7 МН/м². Максимальное давление при расходе сжатого газа 56 г/с /характеристика 3/ всегда ниже предельного, кроме того, теплообменники имеют "запас" по поверхности. Это дало возможность испытать установку в форсированных режимах, т.е. при повышенных расходах сжатого газа * /характеристика 4, рис. 3/. Для безопасности работы давление сжатого газа на входе в установку не поднималось выше 1,7 МН/м². Расход газа изменялся при этом от 60 г/с /ожижительный режим/ до 73,5 г/с /рефрижераторный режим/.

Получены темп охижения 4,2 г/с = 120 л/ч /ожижительный режим/ и холодопроизводительность 470 Вт /рефрижераторный режим/, что соответственно в 1,35 и 1,96 раза превышает паспортные значения установки ХГУ-250/4,5.

Характеристики 3 и 4 /рис. 3/ показывают рост производительности установки ХГУ-250/4,5. Ее эффективность определяется по эксергетическому к.п.д. ^{15/}.

$$\eta = \frac{L_{\text{мин}}}{L_{\text{затр}}}$$

где $L_{\text{мин}}$ - минимальная работа охижения газа и производства холода; $L_{\text{затр}}$ - действительные затраты работы.

В действительных затратах учитывались затраты на сжатие газа и на охижение азота, используемого в блоках очистки и в предварительном азотном охижении. При расчете работы сжатия изотермический к.п.д. компрессоров принимался равным 0,6. Для основного

* Для этого в линию сжатого газа был подключен дополнительный компрессор производительностью 18 г/с.

Таблица 1
Энергетические показатели установки ХГУ-250/4,5

№ характеристики	Ожижительный режим		Рефрижераторный режим					
	$G_L [\frac{L}{c}]$	G_L / G_{L2}	$\eta [\%]$	η / η_2^*	$Q_R [Вт]$	Q_R / Q_{R1}	$\eta [\%]$	η / η_1^*
1	-	-	-	-	245	1	6,3	1
2	2,95	1	6,5	1	-	-	-	-
3	3,6	1,28	7,9	1,22	340	1,4	7,5	1,2
4	4,2	1,41	8,6	1,32	470	1,96	7,42	1,18

* $\eta_1 = 6,3\%$; $\eta_2 = 6,5\%$.

компрессора установки ХГУ-250/4,5 эта величина получена экспериментально. Экспериментально был определен также суммарный расход азота в блоках очистки и в ступени предварительного охлаждения. При расходе сжатого газа 56 г/с расход жидкого азота составляет 33,4 г/с /120 кг/ч/. Удельные затраты на ожижение 1 кг азота приняты 1,2 кВт ч /6/.

Результаты расчета к.п.д. установки в различных режимах приведены в табл. 1, из которой видно, что в новых режимах эффективность установки повышается в 1,2÷1,3 раза.

Основные результаты и выводы

1. Серийная установка ХГУ-250/4,5 предназначена только либо для производства жидкого гелия, либо для криостатирования крупных объектов в рефрижераторном режиме.

2. Переход с критического истечения потока в дюзе на докритический позволил осуществить стабильные комбинированные режимы с предварительным азотным охлаждением в полном диапазоне регулирования установки ХГУ-250/4,5. При этом производительность установки в ожижительном режиме повысилась в 1,22 раза, в рефрижераторном - в 1,4 раза, а ее эффективность - в 1,22 раза.

3. Осуществлены форсированные режимы, при которых производительность установки повысилась в 1,32 раза /ожижительный режим/ и в 1,96 раза /рефрижераторный режим/ по сравнению с паспортными данными, а ее эффективность - соответственно в 1,3 и 1,2 раза.

Авторы пользуются возможностью выразить благодарность главному инженеру ОНМУ Л.Н.Беляеву за большую помощь и постоянный интерес к этой работе, сотрудникам криогенного отдела ЛВЭ В.А.Белушкину, Н.Н.Агапову за полезные дискуссии и ценные замечания, а также всем сотрудникам ОНМУ, принимавшим участие в экспериментах.

Литература

1. Никиткин В.Д. Холодильная гелиевая установка ХГУ-250/4,5. Информационный листок. Сер. 115.19.М, ЦИНТИ химнефтемаш, 1975.
2. Давыдов А.Б. и др. Химическое и нефтяное машиностроение, №9, 1975, стр. 23-25.
3. Агеев А.И. и др. Препринт ОИЯИ, Р8-10039, Дубна, 1976.
4. Фастовский В.Г. и др. Криогенная техника. "Энергия", М., 1974.
5. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. "Энергия", М., 1968.
6. Кислород. Справочник под редакцией Д.Л.Глизманенко. ч. 1, "Металлургия", М., 1967.
7. Агеев А.И. и др. Препринт ОИЯИ, 9-9379, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 апреля 1977 года.