

19/1-70

Б-438

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

8-5237



В.А. Белушкин, Н.Ф. Готвянский, А.Г. Зельдович  
Ю.К. Пилипенко

ОЖИЖИТЕЛЬ ВОДОРОДА С ДЕТАНДЕРОМ  
НА ВСЕМ ПОТОКЕ СЖАТОГО ГАЗА

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1970

8-5237

В.А. Белушкин, Н.Ф. Готвянский, А.Г. Зельдович  
Ю.К. Пилипенко

**ОЖИЖИТЕЛЬ ВОДОРОДА С ДЕТАНДЕРОМ  
НА ВСЕМ ПОТОКЕ СЖАТОГО ГАЗА**

Направлено в журнал "Кислородное и автогенное машиностроение"

8497/2 3p

Для ожижителей водорода средней и большой производительности важное значение приобретает выбор цикла, обладающего высокой экономичностью. В работе <sup>/4/</sup> приведены сравнительные данные по расходу энергии в различных циклах ожижения водорода. Наибольшей экономичностью обладает цикл с детандером, включенным по схеме Клода после предварительного охлаждения сжатого потока водорода жидким азотом. Имеется, однако, другая возможность включения детандера в схему ожижения <sup>/1/</sup>. В этом случае через детандер пропускают весь поток сжатого водорода, где он расширяется от давления  $(120-150) \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> до давления, несколько большего критического  $(15-20) \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>, а затем дросселируется. Экономические показатели такого цикла близки к показателям цикла Клода, но ожижитель, построенный по такой схеме, обладает рядом преимуществ. Во-первых, детандер может быть легко встроен в любой ожижитель, работающий по циклу дросселирования. В случае неполадок с детандером ожижитель может продолжать работать с уменьшенной производительностью по схеме дроссельного ожижителя.

Во-вторых, не требуется регулировка количества газа, идущего на детандер, что значительно упрощает обслуживание установки.

Кроме того, малый удельный объем газа на входе в детандер и малая степень расширения обуславливают весьма компактные размеры расширительной машины.

Следует также отметить, что осуществление цикла Клода на базе существующих машин высокого давления нерационально, так как из условия получения в конце расширения сухого насыщенного пара давление прямого потока должно быть снижено до  $(40-60) \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> (в зависимости от КПД детандера), распределение степени сжатия по ступеням компрессора в этом случае не будет оптимальным, а, следовательно, и фактический расход энергии будет выше, чем на специально спроектированных машинах.

На рис. 1 показан предложенный цикл и изображение его в T-S диаграмме.

Теплообменник (4) после детандера можно не устанавливать, так как его отсутствие незначительно снижает эффективность установки, а переделки дроссельного охладителя в этом случае минимальны: требуются только трубопроводы для подвода сжатого и отвода расширенного в детандере газа.

На рис. 2 представлена расчётная зависимость эффективности описываемого цикла по сравнению с циклом простого дросселирования в зависимости от давления после детандера при разных значениях его КПД. Пунктирная часть кривых соответствует расширению газа в детандере до состояния влажного пара. Температура сжатого водорода после ванны вакуумного азота 86°К, давление  $120 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>, недорекуперация на теплом конце теплообменника (2)  $\Delta t = 1^\circ$ .

Расчёт проведен для случая, когда теплообменник (4) отсутствует. Видно, что изменение давления за детандером в пределах  $(15-40) \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> мало влияет на эффективность охладителя, в то же время расширение в область влажного пара приводит к довольно значительному повышению степени охладения. Проверка работоспособности детандера при работе в таком режиме представляет большой интерес.

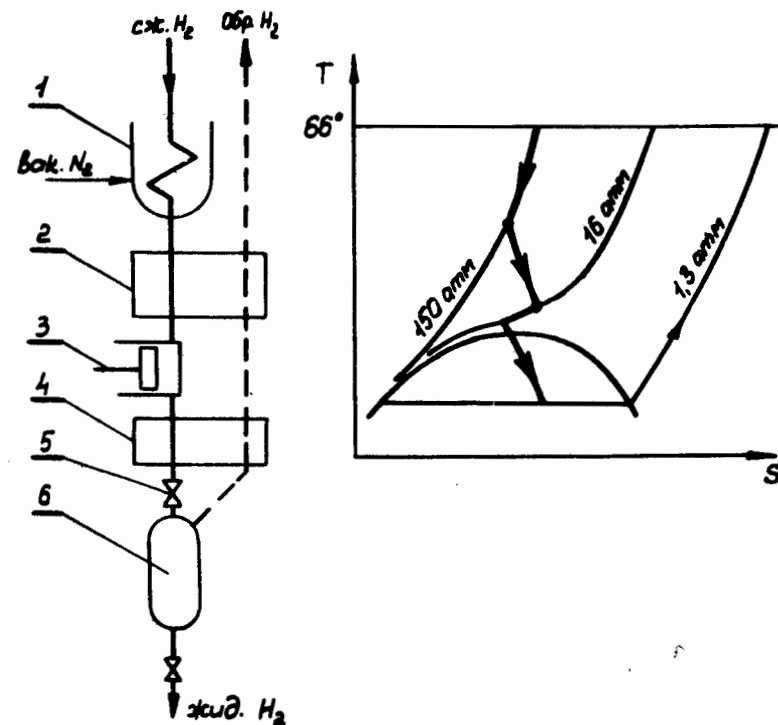


Рис. 1. Схема охладителя с детандером на всем потоке сжатого газа: 1 - ванна вакуумного азота; 2 - теплообменник; 3 - детандер; 4 - теплообменник; 5 - дроссельный вентиль; 6 - сборник жидкого водорода.

Цикл (рис. 1) реализован на ожижителе ВО-2<sup>16/</sup> производительностью 230 л/час в дроссельном режиме. Ожижитель оснащен детандером, разработанным в криогенном отделе ОИЯИ. Первый вариант детандера был сделан по обычной схеме с приводом клапанов от кулачкового вала и поршневым уплотнением, вынесенным в зону с комнатной температурой<sup>15/</sup>. Впоследствии был разработан новый детандер с приводом клапанов от поршня<sup>12/</sup>.

Детандер (рис. 3) расположен рядом с ожижителем и соединен с ним трубопроводами с вакуумной изоляцией 7. На трубопроводах установлены вентили 8,9.

Такая компоновка позволяет производить отогрев и разборку детандера без нарушения режима работы ожижителя. При работе с детандером дроссельный вентиль 3 полностью закрыт, весь поток газа высокого давления после расширения и дросселирования вентилем 8 возвращается в ожижитель. Торможение детандера осуществляется водяным насосом 11, что позволяет в некоторых пределах изменять число оборотов. Кроме того, детандер снабжен регулятором, позволяющим в широких пределах изменять отсечку впуска<sup>13/</sup>.

Эффективность работы установки контролировалась по замерам параметров газа на входе и выходе из детандера, а также по количеству сливаемого жидкого водорода, определяемому разностью между количеством газа, подаваемого компрессорами, и величиной обратного потока водорода, выходящего из ожижителя.

При работе с детандером из ожижителя можно сливать как водород нормального состава, так и параводород.

На график (рис. 2) нанесены опытные точки значений повышения эффективности ожижителя при работе с детандером. Значения адиабатного  $\rho$  д детандера, вычисленные по степени ожигения, лежат в пределах 0,6 - 0,72. Кпд, замеренный по параметрам газа на входе и выходе из детандера, достигает 80-85%.

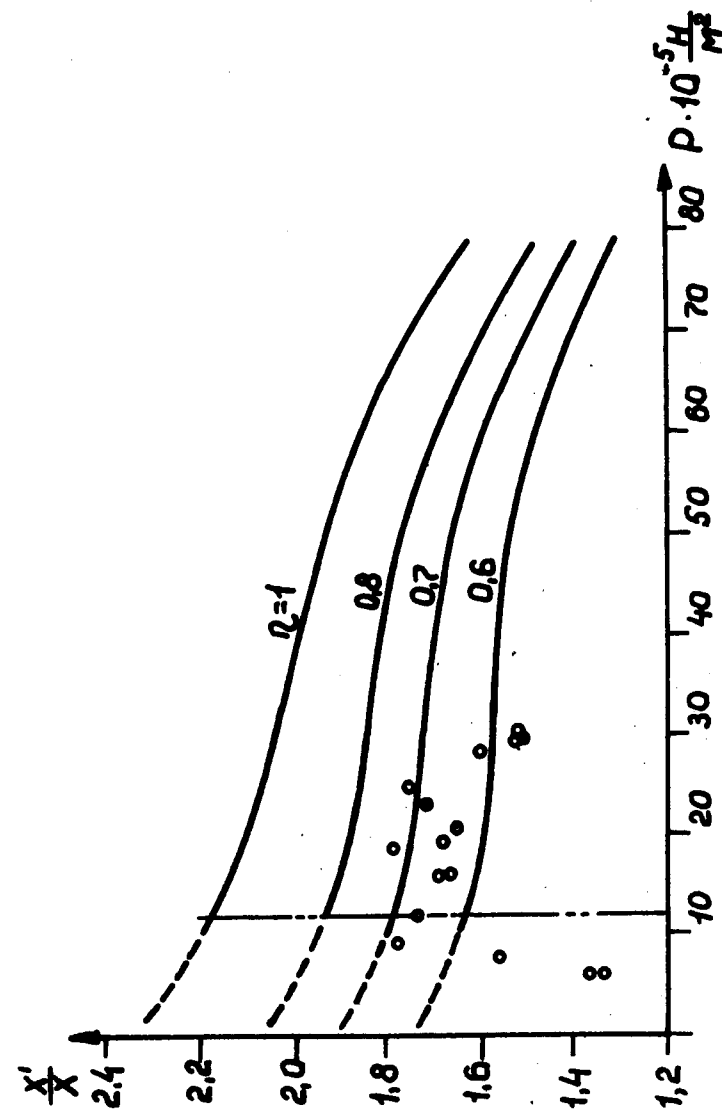


Рис. 2. Повышение эффективности дроссельного ожижителя при включении детандера:  $\frac{X'}{X}$  - отношение доли жидкости при работе с детандером к доле жидкости при работе по циклу однократного дросселирования;  $\rho \cdot 10^{-5}$  - давление после детандера. Сплошные кривые - расчётные для разных значений адиабатного к.п.д. детандера. Пунктирная часть кривых соответствует концу расширения в области влажного пара. На график нанесены опытные точки значений повышения эффективности, замеченные в течение нескольких сеансов ожигения.

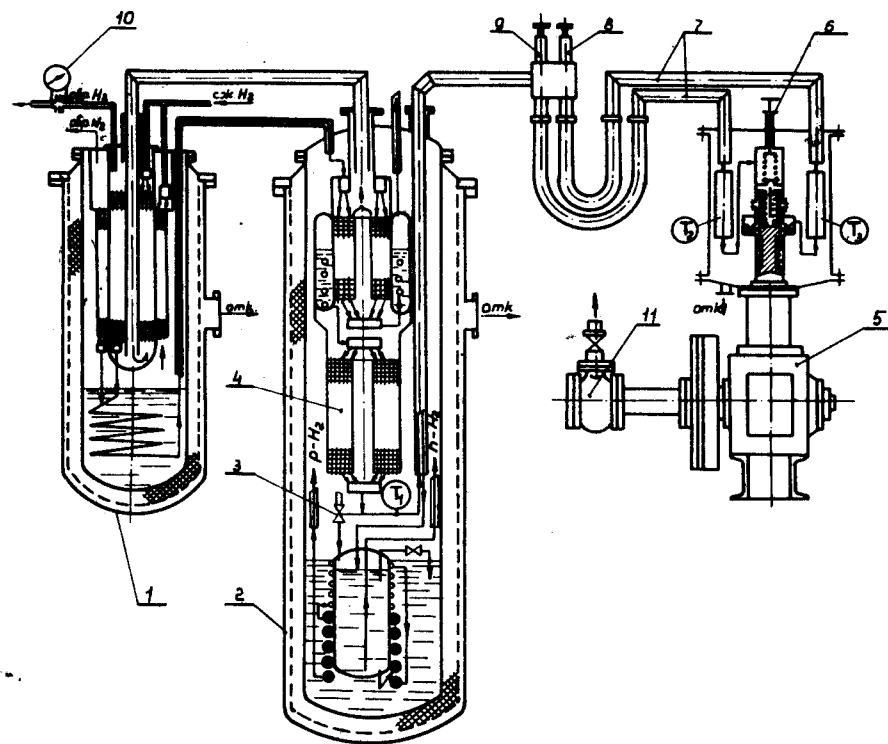


Рис. 3. Схематический чертеж ожижителя ВО-2 с подключенным к нему детандером. 1 - блок предварительного охлаждения; 2 - блок ожижения; 3 - дроссельный вентиль; 4 - концевой теплообменник; 5 - детандер; 6 - регулятор отсечки впуска; 7 - трубопроводы с вакуумной изоляцией; 8 - вентиль на выходе газа из детандера; 9 - вентиль на входе газа в детандер; 10 - расходная диафрагма на обратном потоке водорода; 11 - тормозной водяной насос; T1, T2, T3 - точки замера температуры.

Более низкий кпд детандера, вычисленный по степени ожижения, можно объяснить подогревом газа и парожидкостной смеси в трубопроводах, соединяющих детандер с ожижителем.

Опытные точки хорошо совпадают с расчётом при давлении после детандера в пределах  $(9+29) \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>. При более высоком давлении расширение в цилиндре заканчивается раньше, чем поршень достигнет нижней мертвой точки, что ведет к снижению кпд детандера. Расширение в область влажного пара до давлений  $(5+7) \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> приводит к значительному увеличению перетечек через выпускной клапан, что объясняется конструктивными особенностями машины. Опытные точки в этой области лежат значительно ниже расчётных.

Вопреки обычно высказываемым опасениям, наличие жидкости в цилиндре детандера не является опасным. Даже при переполнении сборника ожижителя, когда сжатый водород, поступающий в детандер, конденсируется, можно продолжать работу, не останавливая детандер.

Характеристика ожижителя при работе в режиме дросселирования и с детандером для одного из экспериментов приведена в табл. 1.

Таблица 1

	Без детандера	С детандером
Количество перерабатываемого водорода	710 нм <sup>3</sup> /час	710 нм <sup>3</sup> /час
Давление сжатого водорода	$125 \cdot 10^5$ н/м <sup>2</sup>	$130 \cdot 10^5$ н/м <sup>2</sup>
Количество сливаемого параводорода	140 л/час	247 л/час

Эксплуатация ожижителя ВО-2, снабженного детандером в течение 1968-70 г.г., показала, что предложенная схема весьма удобна в работе и может быть рекомендована для повышения производительности

дроссельных установок с минимальными переделками существующего оборудования.

Авторы пользуются случаем выразить глубокую благодарность коллективу группы эксплуатации криогенного отдела, обеспечившей возможность проведения экспериментов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ю.К. Пилипенко, А.Г. Зельдович. Авторское свидетельство №145251, кл. 17, д., 1.
2. В.А. Белушкин, Н.Ф. Готвянский. Авторское свидетельство №208723, кл. 17а, 5.
3. Н.Ф. Готвянский. Авторское свидетельство №223104, Бюлл. изобр. №24, 1968.
4. J. Macinco, D.B. Chelton, J. Dean. Hydrogen Liquefaction Cycles. Adv. in Cryog. Eng., vol. 3, 1960.
5. N.I. Balandikov, V.A. Belushkin, L.B. Golovanov, E.I. D'yachkov, A.G. Zel'dovich, Yu.K. Pilipenko. Some Cryogenic Developments at the Joint Institute for Nuclear Research, Cryogenics, vol. 6, 1966.
6. А.Г. Зельдович, Ю.К. Пилипенко. ПТЭ, №5, 1964 г.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 июля 1970 года.