

Б-438

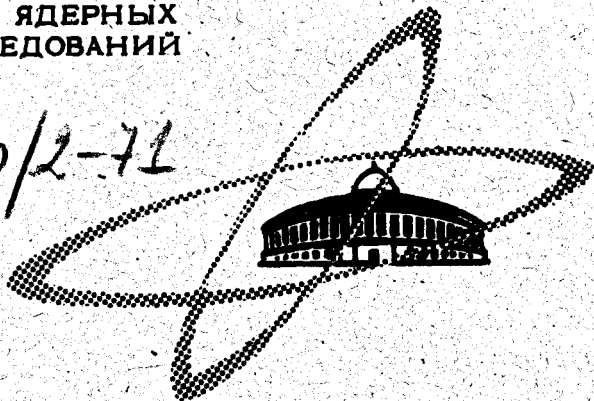
29/11-71

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

960/2-71

P8 - 5531



В.А. Белушкин, Н.Ф. Готвянский

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

НОВЫЙ ПОРШНЕВОЙ ДЕТАНДЕР
ДЛЯ ВОДОРОДНОГО ОЖИЖИТЕЛЯ

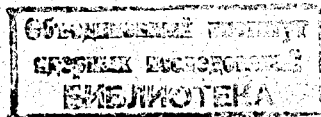
1970

P8 - 5531

В.А. Белушкин, Н.Ф. Готвянский

**НОВЫЙ ПОРШНЕВОЙ ДЕТАНДЕР
ДЛЯ ВОДОРОДНОГО ОЖИЖИТЕЛЯ**

Направлено в журнал "Химическое и нефтяное
машиностроение"



Поршневые детандеры с приводом клапанов поршнем выгодно отличаются от машин с традиционной схемой привода клапанов от кулачкового вала простотой конструкции, надежностью, возможностью значительного повышения быстроходности.

В Советском Союзе первые модели таких машин были созданы в Московском энергетическом институте В.М. Бродянским и сотрудниками /1,2/.

В Объединенном институте ядерных исследований разработан и пущен в эксплуатацию новый тип детандера с приводом клапанов поршнем /3/. Этот детандер предназначен для ожижителя водорода производительностью около 350 л/час /4/.

Принцип действия механизма газораспределения детандера поясняет рис. 1. Когда поршень 1 приближается к нижней мертвой точке (положение I) буртик 6 поршня набегают на выпускной клапан 5 и отрывает его от седла. В цилиндре начинается процесс выхлопа и при дальнейшем движении поршня к верхней мертвой точке - выталкивание газа из цилиндра (положение II). Выпускной клапан 5 будет открыт до тех пор, пока подпружиненная втулка 3 не заставит клапан подняться и сесть на седло. Пружина 2 начинает сжиматься, в цилиндре происходит процесс сжатия оставшегося газа (положение III). В этой фазе толкатель 7 набегают на выпускной клапан 9, но клапан остается закрытым,

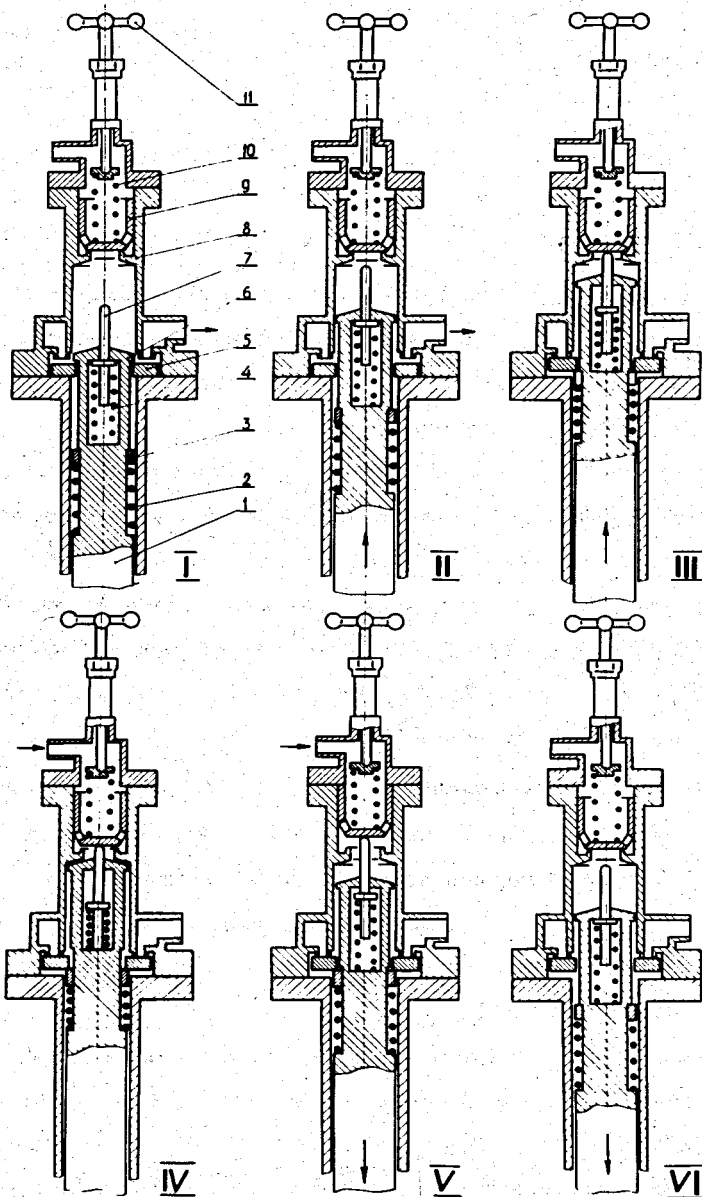


Рис. 1. Принцип действия механизма газораспределения. 1 - поршень; 2,4,10 - пружины; 3 - втулка; 5 - клапан выпуска; 6 - буртик поршня; 7 - толкатель; 8 - головка цилиндра; 9 - клапан впуска; 11 - регулятор отсечки выпуска.

так как сумма усилий, действующих на него со стороны впускного отверстия, больше суммы усилий, действующих со стороны цилиндра. Клапан откроется, когда толкатель упрется в дно гнезда в поршне (положение IV). Это происходит вблизи верхней мертвой точки. В цилиндре начинается процесс наполнения. При дальнейшем движении поршня вниз впускной клапан будет оставаться открытым под действием разности усилий пружин 4 и 10 (положение V). Клапан закроется, когда усилие пружины 10 станет больше усилия пружины 4 (положение VI). В цилиндре начнется процесс расширения газа. Силу предварительного сжатия пружины 10 впускного клапана можно регулировать винтовым механизмом 11. Это позволяет плавно и в широких пределах изменять отсечку впуска ^{/5/}.

В процессах наполнения V и расширения VI выпускной клапан закрыт, так как его удерживают пружина 2 и разность давлений по обе стороны клапана.

В дальнейшем цикл работы повторяется. Такой механизм привода клапанов позволяет получить фазы газораспределения и индикаторную диаграмму, ничем не отличающиеся от тех, какие обеспечивает обычный кулачковый привод. В то же время этот механизм проще, состоит из меньшего количества деталей, весь размещен внутри цилиндра - не требуется связи его с коленчатым валом. Очень просто регулируется отсечка впуска. Отсутствие сальников в механизме привода повышает надежность и безопасность работы. В процессе расширения не может возникнуть "петля" на индикаторной диаграмме: как только давление в цилиндре станет равным давлению в выпускной трубе, клапан выпуска автоматически откроется.

Клапаны детандера разнесены друг от друга. Это позволяет увеличить их проходные сечения, уменьшить потери от дросселирования. Наличие прямого тока рабочего газа в цилиндре снижает гидравлические потери и внутренний теплообмен.

Конструктивная схема детандера представлена на рис. 2. Механизм движения 2 - обычный кривошипно-шатунный. Картер 1 тщательно герметизован и находится под водородом. Поршень 3 снабжен поршневым уплотнением 4, работающем при комнатной температуре. Нижняя часть цилиндра 5 имеет водяную рубашку для снятия тепла трения. Вытеснитель 7 и "холодный" тонкостенный цилиндр 6 отделяют рабочую зону цилиндра от частей, работающих при комнатной температуре. В головке цилиндра 11 размещены впускной 13 и выпускной 9 клапаны. Механизмы привода клапанов 8 и 10 установлены в вытеснителе. На входе и выходе газа из детандера имеются фильтры-ресиверы 20 и 21. Все части, работающие при низкой температуре, заключены в кожух 15, заполненный стекловатой. Кожух откачивается форвакуумным насосом. Трубопроводы 16, 17, соединяющие детандер с ожижителем, имеют экрано-вакуумную изоляцию. На выпускном трубопроводе установлен предохранительный клапан 19. Механизм регулировки отсечки спуска 18 вынесен наружу и позволяет менять производительность машины в процессе работы. Торможение детандера осуществляется водяным насосом. Это позволяет регулировать число оборотов. Детандер снабжен контрольно-измерительными приборами, позволяющими непрерывно следить за качеством его работы. Для снятия индикаторной диаграммы нами использована с некоторыми переделками простая и надежная схема с пьезоэлектрическими датчиками давления, разработанная во ВНИИХИ^{16/}.

Сигналы от датчика 12 и отметчика 14 давлений поступают на электронный осциллограф типа С-1-4. На индикаторную диаграмму могут быть нанесены также отметки углов поворота коленчатого вала от фотоэлектрического датчика (на рис. 2 не показан). Замер температур осуществляется медно-константановыми термопарами (при работе в пусковом режиме), платиновыми образцовыми термометрами сопротивления и конденсационными термометрами, заполненными неоном. В диапазоне температур 44-30°К последние обеспечивают точность замера не хуже 0,05°К.

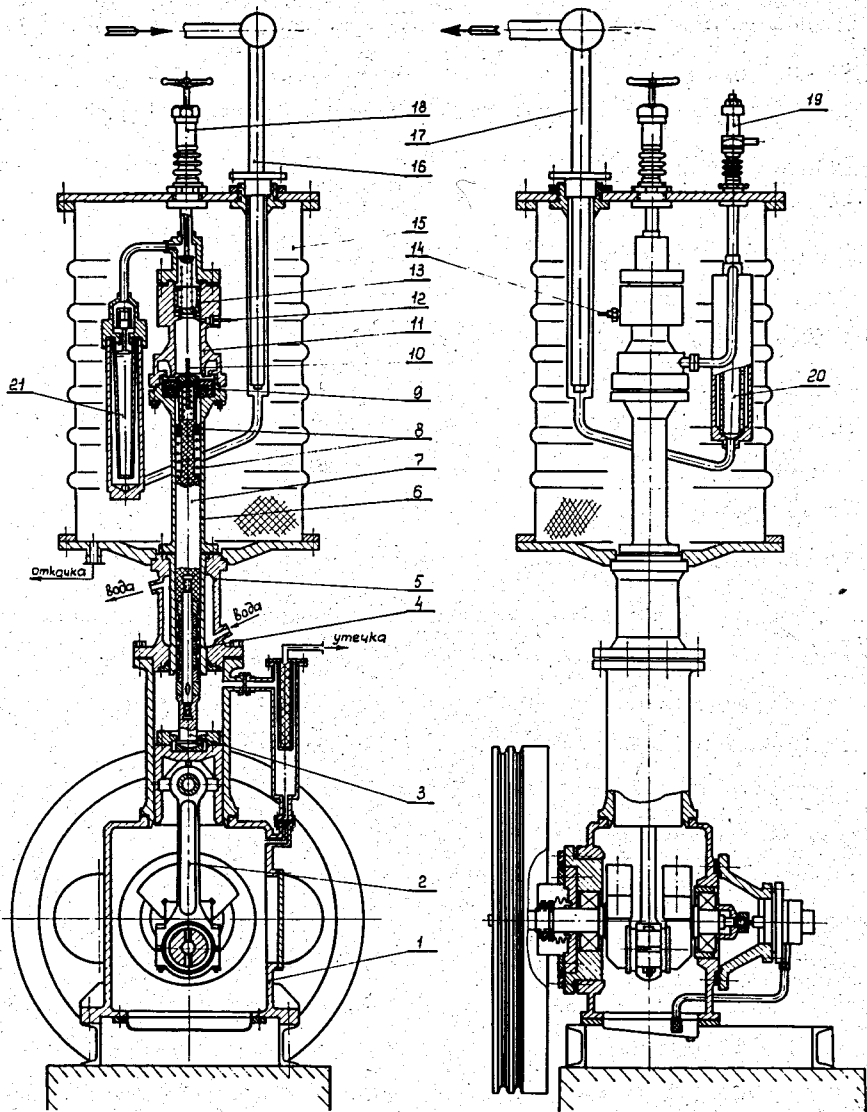


Рис. 2. Общий вид детандера. 1 - картер; 2 - механизм движения; 3 - поршень; 4 - поршневое уплотнение; 5 - "теплый" цилиндр; 6 - "холодный" цилиндр; 7 - вытеснитель; 8 - механизм привода выпускного клапана; 9 - клапан выпуска; 10 - механизм привода впускного клапана; 11 - головка цилиндра; 12 - датчик давления; 13 - клапан впуска; 14 - отметчик давления; 15 - вакуумный кожух; 16 - трубопровод впуска; 17 - трубопровод выпуска; 18 - регулятор отсечки впуска; 19 - предохранительный клапан; 20 - фильтр-ресивер выпуска; 21 - фильтр-ресивер впуска.

Давления измерялись манометрами точных измерений (МТИ) класса 0,6.

Ниже приведены основные технические данные детандера.

Диаметр цилиндра	40 мм
Ход поршня	100 мм
Давление на впуске	100-150 бар
Давление на выпуске	6-40 бар
Температура на впуске	48-42°K
Количество перерабатываемого водорода	
расчётное	1200 нм ³ /час
фактическое	700-800 нм ³ /час
Число оборотов	до 400 об/мин.

Более низкое, чем расчётное, количество перерабатываемого газа объясняется тем, что такова фактическая производительность имевшихся в нашем распоряжении компрессоров. В связи с этим число оборотов детандера в рабочем режиме невелико - 160-200 об/мин.

Так как детандер такой конструкции с подобными параметрами создан впервые, остановимся более подробно на некоторых его особенностях.

На рис. 3 показан разрез цилиндровой группы машины. Впускной клапан 14 с направляющей и уплотнительной прокладкой из фторопласта 3 расположен в съёмном седле из нержавеющей стали X18H10T. Привод клапана осуществляется толкателем 9, имеющим текстолитовую рубашку. Пружины 5 и 13 из бериллиевой бронзы обеспечивают нужную величину отсечки впуска. Изменение отсечки производится регулятором 12. Наиболее ответственным узлом машины является выпускной клапан 7. Уплотнение его по седлу происходит одновременно по двум поверхностям, поэтому требуется тщательная обработка седла и уплотнительных поверхностей клапана. В процессе доводки машины были испытаны многочис-

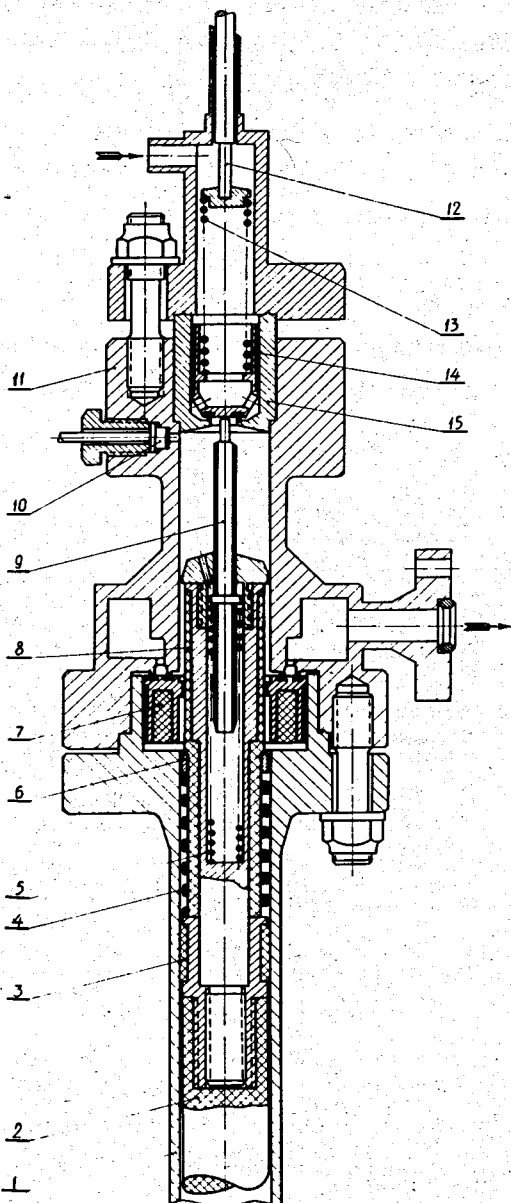


Рис. 3. Разрез через цилиндрическую часть дегандера. 1 - "холодный" цилиндр; 2 - вытеснитель; 3 - направляющая; 4,5,13 - пружины; 6 - втулка; 7 - клапан выпуска; 8 - рубашка поршня; 9 - толкатель; 10 - датчик давления; 11 - головка цилиндра; 12 - регулятор отсечки; 14 - клапан выпуска; 15 - седло клапана.

ленные варианты конструкции клапана с уплотнительными прокладками из разных материалов: кожа, фторопласт 4, заливки из мягких металлов и т.п. Лучшие результаты получены с клапаном из титана и прокладками из фторопласта 3. Для уменьшения веса в клапане сделана кольцевая проточка, заполненная текстолитом. Из текстолита изготовлена и направляющая рубашка клапана. Ввиду высокой твердости фторопласта 3 на уплотнительных поверхностях не образуется сколько-нибудь заметной канавки, и герметичность клапана не нарушается при охлаждении машины, несмотря на значительную разность в величине термических деформаций седла (сталь X18H10T) и клапана (титан BT-5). Механизм привода выпускного клапана состоит из бронзовой втулки 6 и пружины 4, надетых на текстолитовую рубашку 8 поршня. Пружина 4 изготовлена из стальной проволоки (сталь 70) и проточена по наружному и внутреннему диаметрам так, что сечение витка близко к прямоугольному. Несмотря на то, что пружина работает при низких температурах, где ударная вязкость стали близка к нулю, она оказалась вполне работоспособной.

Вытеснитель 2 поршня изготовлен из текстолита и установлен в цилиндре 1 с зазором 0,1-0,15 мм на сторону. На вытеснителе имеется направляющая втулка 3 из фторопласта 4 с дисульфидом молибдена.

Характерной особенностью такой машины является наличие большого мертвого объема. В выполненной конструкции этот объем составляет около 40% и едва ли его можно сделать менее 20%. Как показано, ниже, даже с таким мертвым объемом эффективность работы машины достаточно высока.

В качестве поршневого уплотнения были испытаны обычные чугунные поршневые кольца со смазкой и кожаные манжеты. В первом случае даже при строгой дозировке количества подаваемой смазки не исключается возможность попадания ее в холодный цилиндр, что вызы-

вадет нарушение работы клапанов. Лучшие результаты получены с манжетами из обезжиренной кожи, пропитанной под вакуумом парафином. Для улучшения работы уплотнения в водяную рубашку цилиндра подается теплая вода. Для такой машины безусловно перспективным является применение несмазываемых уплотнений из фторопластовых или графитовых композиций /7/.

Как уже указывалось, детандер предназначен для водородного ожигителя. В схему ожигения он включен так, что через него проходит весь поток газа высокого давления /4/. Характерными особенностями работы детандера являются малая степень расширения $\frac{P_{вх}}{P_{вых}} < 10$ при высоком (около 150 бар) начальном давлении и низкая температура на входе (48-42°K). Перепад температур невелик - всего 8-10°K. Процесс расширения происходит в области, где свойства водорода сильно отличаются от свойств идеального газа. Показатель адиабаты переменен, резко меняется величина и даже знак дроссель-эффекта: при параметрах входа $\alpha_1 < 0$, при параметрах выхода $\alpha_1 > 0$ (рис. 4).

Как показал расчёт /4/, давление за детандером сравнительно слабо влияет на показатели работы ожигителя. В процессе испытаний это давление менялось в широких пределах от 6 до 35 бар. Достоверные значения кпд, вычисленные по замерам внешних параметров, можно получить только при достаточно высоком давлении за детандером (не менее 20 бар). При более низком возможна большая ошибка в определении энтальпий, так как изобары почти эквидистантны изотермам вблизи критической точки. Если расширение заканчивается в области влажного пара (точка 4 на рисунке 4), вычислить значение кпд по замеренным давлениям и температурам вообще нельзя. В этих случаях кпд определялся из уравнений теплового баланса установки по величине степени ожигения.

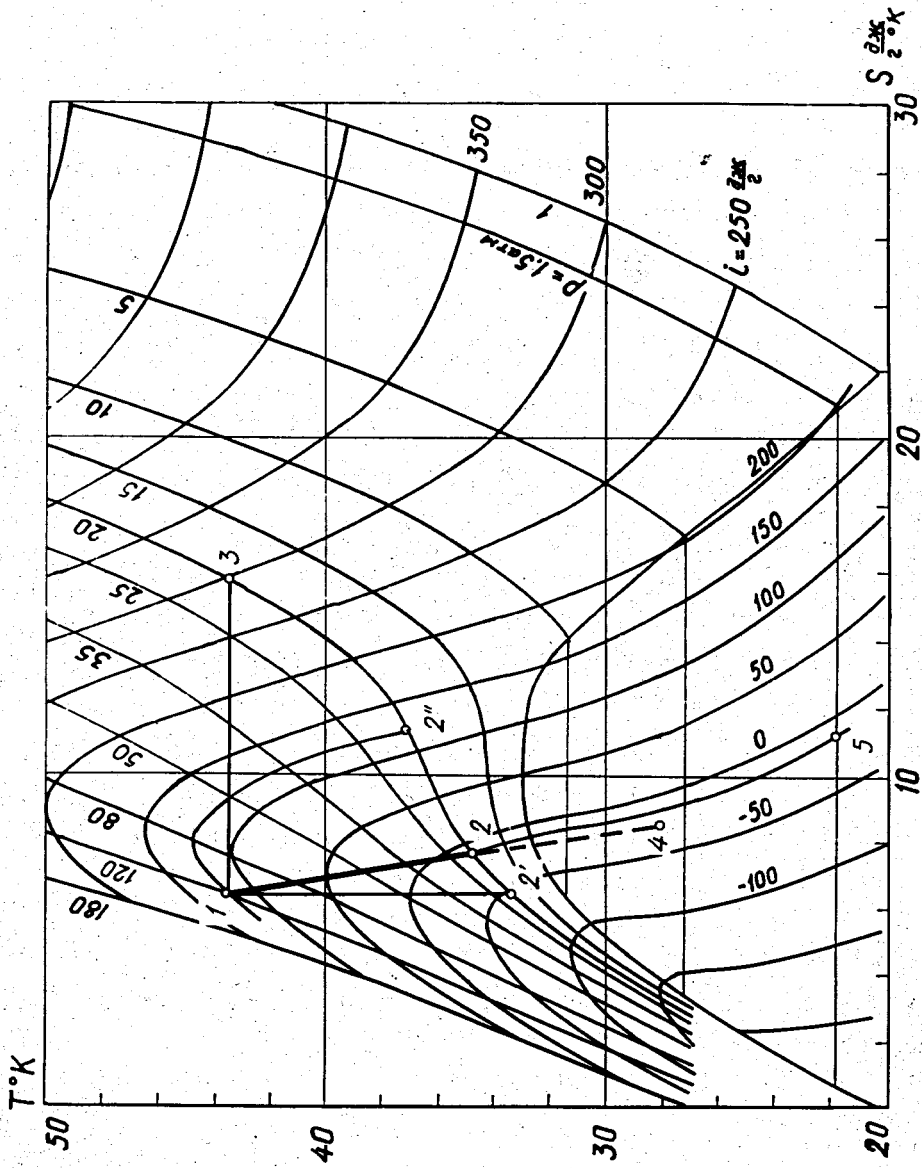


Рис. 4. Процесс расширения в дегандере в Т-S диаграмме для водорода.

На рис. 5 приведены индикаторные диаграммы детандера при работе в разных режимах. Диаграммы а и б получены при комнатной температуре газа на входе в детандер и различных величинах отсечек выпуска. Точки на диаграммах - отметки угла поворота коленчатого вала через каждые 15° .

Малая величина степени обратного сжатия в этом режиме объясняется не только большим мертвым объемом, но и значительными перетечками газа через выпускной клапан. Условный показатель политроны сжатия, рассчитанный без учета утечек, меньше единицы. Перетечки возрастают при сжижении давления за детандером, на что указывает появление характерного завала на линии выпуска (диаграммы б).

При снижении температуры характер индикаторных диаграмм существенно меняется (в,г). Давление в конце сжатия резко возрастает при той же величине отсечки выпуска; давление в конце расширения значительно ниже при той же величине отсечки выпуска. Это объясняется увеличением показателя адиабаты при температурах, близких к критической, а также снижением относительной величины перетечек в связи с увеличением расхода газа через детандер. Оптимальная отсечка выпуска в рабочем режиме 0,55-0,7, что значительно выше, чем для воздушных машин.

Большой интерес представляет исследование работы детандера в режиме, когда в конце расширения получается влажный пар. Теоретически ^{/4/} в этом случае степень ожигения должна возрасти. Обычно высказывается мнение, что при такой работе должен резко ухудшиться КПД в результате увеличения коэффициента теплоотдачи от жидкости к стенке, а гидравлические удары могут привести к поломке машины. Мы исследовали работу детандера в таком режиме и убедились, что эти опасения напрасны. Если давление за детандером достаточно высоко (выше 8-10 бар), характер и эффективность работы машины не зависят от того, каково состояние водорода в конце расширения: газ,

влажный пар или жидкость. Даже если в конце расширения получается 100% жидкость (диаграмма е), кпд детандера достигает величины 0,75-0,8. Расширение в этом случае заканчивается раньше, чем поршень дойдет до нижней мертвой точки; выпускной клапан автоматически открывается, как только давление в цилиндре станет равным давлению в выпускном трубопроводе. Не представляет опасности и режим, когда в детандер подается жидкий водород, сжатый до 100-150 бар (диаграмма ж). Такой режим возникает в результате переполнения сборника оживителя водородом, в результате чего труба подачи газа в детандер оказывается под заливом. В процессе обратного сжатия давление в детандере становится выше, чем давление во впускном трубопроводе, впускной клапан срабатывает как предохранительный. Как и в случае "е", линия расширения идет очень круто, расширение заканчивается преждевременно.

Результаты испытаний детандера при комнатной температуре газа на входе показаны на графиках рис. 6. Невысокая эффективность детандера в этих условиях объясняется значительной величиной потерь по отношению к количеству перерабатываемого газа (100-180 м³/час). Особенно большое влияние оказывают перетечки газа через выпускной клапан. Максимальные значения адиабатного кпд, достигающие 70-75%, получены при степени расширения около 2,5. Такой режим соответствует практически полному расширению газа в цилиндре (процесс выхлопа отсутствует); давление в конце обратного сжатия близко к давлению впуска - это уменьшает вредное влияние мертвого объема^{/8/}; в таких условиях обеспечивается лучшая герметичность выпускного клапана.

Кривая 1 на рисунке рассчитана по уравнению, приведенному в работе^{/9/}:

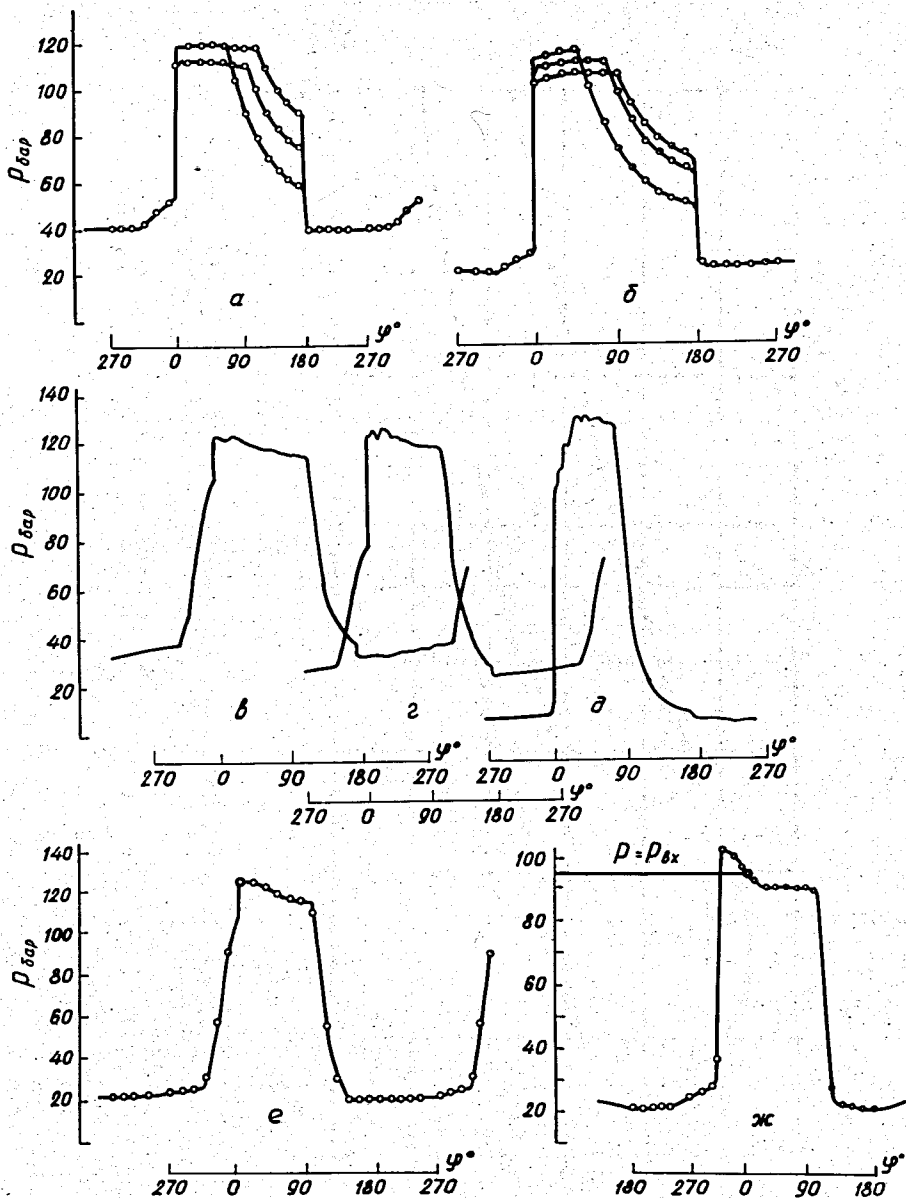


Рис. 5. Осциллограммы индикаторных диаграмм детандера при работе в разных режимах. а,б - $T_{вх} = 290^\circ\text{K}$, пусковой режим; в,г - $T_{вх} = 43^\circ\text{K}$, рабочий режим, д - расширение в область влажного пара; е - $T_{вх} = 38,4^\circ\text{K}$, $T_{вых} = 32,1^\circ\text{K}$, в конце расширения-жидкость; ж - $T_{вх} = 27^\circ\text{K}$, на входе в детандер жидкость.

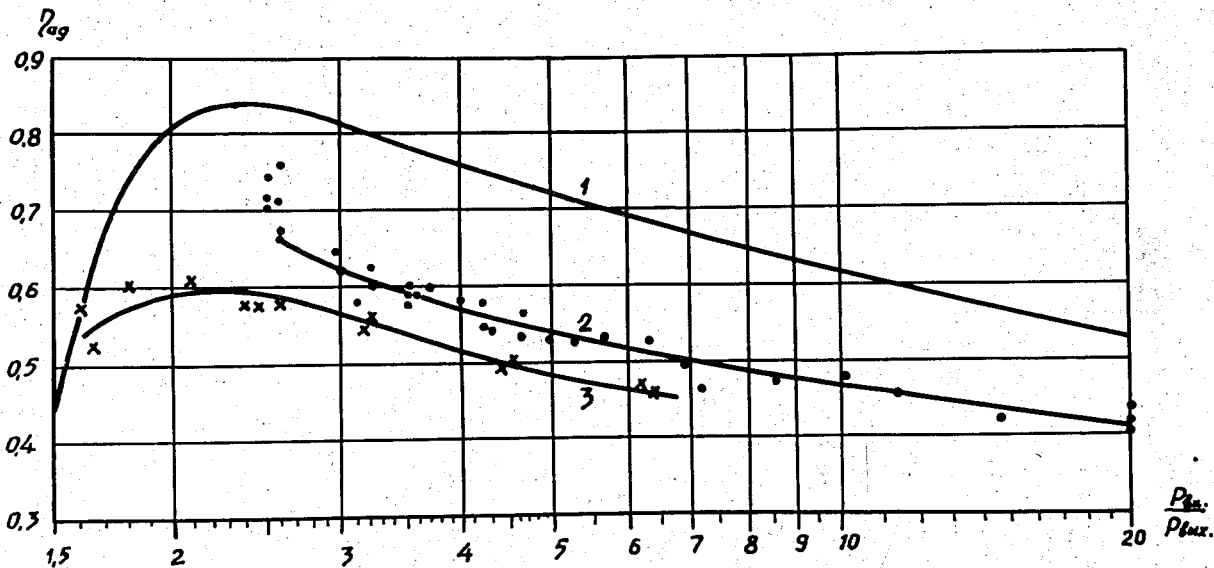


Рис. 6. Зависимость адиабатного кпд детандера от степени расширения.
 1 - теория/9/; 2 - $P_{вх} = 100-125$ бар, $T_{вх} = 290^{\circ}\text{K}$, $n = 290$ об/мин;
 3 - $P_{вх} = 60$ бар, $T_{вх} = 290^{\circ}\text{K}$, $n = 290$ об/мин.

$$\eta = 1 - \frac{\sigma \frac{(a_0 + C_0)^K}{(1 + a_0)} + K - K b_0 - a_0 - 1}{1 - (\sigma')^{\frac{1-K}{K}}},$$

при $a_0 = 0,5$, $b_0 = 0$, $C_0 = 0,3$, $\sigma' = \sigma$, $K = 1,4$. Здесь $\sigma = \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}}$ - степень расширения, a_0 - относительная величина мертвого объема, b_0 - отсечка выпуска, c_0 - отсечка впуска, K - показатель адиабаты.

Полученные результаты указывают на то, что при соответствующем подборе отсечек впуска и выпуска можно добиться вполне удовлетворительных показателей работы детандера в этих условиях.

В таблице 1 приведены результаты обработки экспериментальных данных в режиме получения жидкого водорода. При расчётах использована T-S диаграмма для параводорода^{/12/}, на которой нанесены изобары до 340 атм. Отклонение свойств орто- и парамодификаций водорода невелико и не превышает ошибки, связанной с неточностью снятия параметров газа по T-S диаграмме и неточностью самой диаграммы в этой области.

Таблица

Режим	$P_{\text{вх}}$ бар	$P_{\text{вых}}$	$T_{\text{вх}}$ $^{\circ}\text{K}$	$T_{\text{вых}}$	$\eta_{\text{ад}}$	η_e	η_s
1	135	30	43,3	36,0	0,76	0,8	0,74
2	133	24,6	43,45	34,9	0,8	0,87	0,8
3	134	21,5	43,95	34,4	0,8	0,87	0,8
4	125	18	43,5	34,5	0,7	0,8	0,7

В отдельных случаях было получено значение адиабатного КПД до 0,85. Основной причиной значительного разброса данных по КПД является, как уже упоминалось, степень герметичности выпускного клапана, который очень чувствителен к попаданию грязи на уплотнительные поверхности.

Кроме общепринятого адиабатного КПД $\eta_{ад} = \frac{\Delta i_{1-2}}{\Delta i_{1-2}}$, в таблице 1 приведены значения эксергетического ^{/10/} КПД:

$$\eta_e = \frac{\Delta e_{2-3} + \ell}{\Delta e_{1-3}} \approx 1 - \frac{\Delta S_{1-2}}{\Delta S_{1-3}},$$

где Δe и ΔS — разности эксергий и энтропий между соответствующими точками, ℓ — индикаторная работа. Этот коэффициент характеризует потерю от необратимости в результате отклонения процессов в детандере от идеального адиабатного. Однако его нельзя использовать для оценки технического совершенства различных машин, так как значение этого коэффициента существенно зависит от температурного уровня, степени расширения и свойств рабочего газа. В последней графе таблицы 1 вычислена величина "энтропийного" ^{/11/} КПД:

$$\eta_s = 1 - \frac{\Delta S_{1-2}}{\Delta S_{1-2}}.$$

Испытания детандера проводились в течение 1968–1970 г.г. совместно с ожижителем водорода ВО-2, в схему которого он включен ^{/4/}. К настоящему времени в основном закончена доводка отдельных узлов и деталей машины, и детандер используется при необходимости получения большого количества жидкого водорода. Машина проста и достаточно надежна в эксплуатации.

Работа выполнена под руководством профессора А.Г. Зельдовича, помощь и поддержка которого помогли нам преодолеть многочисленные трудности и неудачи.

Первый вариант детандера был изготовлен в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований. К.А. Байчеру, В.Н. Дмитриевской, Ю.А. Кузнецову, а также сотрудникам криогенного отдела и мастерских Лаборатории высоких энергий с большим желанием и интересом занимавшимся этой работой, авторы выражают глубокую благодарность.

Особую признательность мы выражаем профессору В.М. Бродянскому за ценные советы и очень полезные дискуссии.

Л и т е р а т у р а

1. В.М. Бродянский, Н.М. Савинова. "Кислородное и автогенное машиностроение" ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, № 1, 1966.
2. В.М. Бродянский, А.Б. Грачев. Там же.
3. В.А. Белушкин, Н.Ф. Готвянский. Авторское свидетельство № 208723, Бюллетень изобретений № 4, 1968.
4. В.А. Белушкин, Н.Ф. Готвянский, А.Г. Зельдович, Ю.К. Пилипенко. Препринт ОИЯИ, № 8-5237, 1970.
5. Н.Ф. Готвянский. Авторское свидетельство № 223104. Бюллетень изобретений № 24, 1968.
6. Е.М. Агарев, Л.Е. Медовар. Электронные индикаторы для холодильных компрессоров. Госторгиздат 1962.
7. И.Х. Караусов, Г.Н. Борзенков. Криогенное, кислородное и автогенное машиностроение № 1, 1970.
8. И.Б. Данилов, В.Т. Ковачев. Тезисы докладов советско-японской конференции по физике низких температур, Новосибирск, 1959.
9. А.М. Архаров. Низкотемпературные газовые машины. "Машиностроение" 1969 г.

10. В.М. Бродянский, А.Б. Грачев, Н.М. Савинова. Известия ВУЗ, ов. Энергетика, №3, 1967.
11. И.И. Гильман. Оценка термодинамической эффективности поршневых детандеров. Труды ВНИИКИМАШ, выпуск 8, 1964.
12. Edited by R.B. Scott. Technology and Uses of Liquid Hydrogen. Pergamon Press, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 декабря 1970 года.