
The use of combined inlet valve in the straight-flow expander stage with the possibility of the forced opening at the end of the process of return compression is considered. A comparative analysis of the operation of the high pressure expander with usual and combined inlet valves is carried out. In the latter case the right choice of the value of the forced stroke of valve plate is important. The optimum of this value can be easily determined using the proposed and tested by the author program of calculation of the expander stage.

В высокооборотных поршневых детандерах среднего и высокого давления наиболее рационально применять прямоточные ступени с впускным самодействующим клапаном, расположенным на торце цилиндра. Среди прочих к конструкции ступени предъявляется не всегда выполнимое требование: относительное мертвое пространство ступени a не должно превышать предельной величины $a_{\text{пр}}$, при которой впускной клапан в конце процесса обратного сжатия перестает открываться, что ведет к прекращению подачи газа на вход детандера. Та же картина наблюдается в случае работы ступени при конечном давлении за детандером ниже расчетного, соответствующего работе детандера наnominalном режиме.

При использовании прямоточных детандеров в качестве источника механической энергии идут по пути увеличения мертвого пространства ступени, поскольку это приводит к росту индикаторной работы за цикл. Но при комплектации ступени самодействующим впускным клапаном степень возможного увеличения a и в этом случае ограничивается условием $a \leq a_{\text{пр}}$.

Альтернативным решением является применение в составе прямоточной детандерной ступени комбинированного впускного клапана, конструкция которого предусматривает возможность принудительного открытия клапана в конце процесса обратного сжатия при подходе поршня к верхней мертвой точке (ВМТ) независимо от величины a , условий теплообмена и соотношения давлений газа в цилиндре $p_{\text{ц}}$ и впускной полости $p_{\text{в.п}}$ детандера в этот момент времени.

Конструктивное исполнение комбинированного впускного клапана и особенности его работы поясним на примере детандерной ступени, укомплектованной клапанами со сферической тарелкой (рис. 1). В седло клапана 3 вмонтирован толкатель 7, действующий через пружину 6 на пластину 5 клапана. При угле поворота вала $\phi = 0^\circ$ (рис. 1, точка I) поршень 2 находится в ВМТ на расстоянии линейного зазора ΔS_l от торцевой поверхности клапана, контактируя с нижней кромкой толкателя, кото-

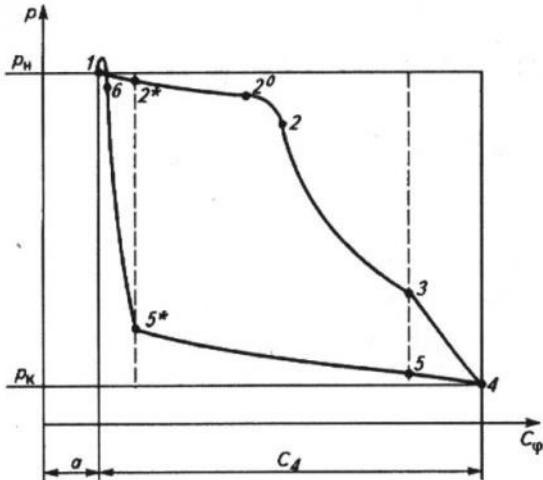


Рис. 2. Рабочий цикл прямоточной ступени детандера с принудительным открытием впускного клапана в координатах давление P – относительный ход поршня C_p

Рабочий цикл детандерной ступени с комбинированным впускным клапаном на входе и золотниковым газораспределением на выхлопе, отражающий совокупность рассмотренных процессов, показан на рис.2. Математическое описание отдельных процессов и цикла в целом легло в основу разработанной программы расчета детандерной ступени с комбинированным самодействующим клапаном. Программа ориентирована на два основных типа самодействующих нормально открытых клапанов, хорошо зарекомендовавших себя при работе в составе прямоточных высокооборотных ступеней традиционного исполнения: многоэлементные кольцевые и индивидуальные клапаны с пластиной сферической формы.

Для сравнительной оценки однотипных впускных клапанов в обычном А и комбинированном Б вариантах исполнения был выполнен расчетный анализ работы детандера высокого давления ДПВ4.2-200/6М, техническая характеристика которого приведена ниже.

Техническая характеристика ДПВ4.2-200/6М (номинальный режим)

Диаметр цилиндра D , мм	55
Ход поршня $S_{\text{п}}$, мм	90
Частота вращения вала n , об/мин	400
Начальное давление p_h , МПа	20
Конечное давление p_k , МПа	0,6
Начальная температура T_h , К	300
Вариант исполнения клапанов	
Относительное мертвое пространство a , %:	
А	≤ 8
Б	Любое
Максимальный ход пластины $h_{\text{кл}}$, мм	0,8
Принудительный ход пластины S_2^* , мм:	
А	0
Б	0,7

При выполнении численного анализа ставились следующие задачи:

✓ Изучить комбинированный рабочий цикл прямоточной детандерной ступени, оснащенной модернизированным нормально открытым впускным клапаном, и выявить его характерные особенности.

✓ Оценить перспективы применения комбинированного цикла в детандерных ступенях с малым рабочим объемом при повышенных значениях a .

✓ Показать преимущества комбинированного цикла при работе детандерной ступени на режимах с переменным конечным давлением.

✓ Обосновать целесообразность использования комбинированного цикла в детандер-генераторных агрегатах (ДГА), преобразующих энергию сжатого природного газа в механическую работу при положительной температуре газа на выходе детандерной ступени и заданной мощности на валу.

Предварительный анализ полученных расчетных данных показал, что прямоточная детандерная ступень, укомплектованная модернизированным впускным клапаном, работает по 6-фазному циклу, характерному для детандеров с принудительным двухклапанным газораспределением. В то же время процесс наполнения подчиняется закономерностям, присущим высокооборотным детандерам с самодействующими впускными клапанами.

Совокупность этих факторов позволяет утверждать, что рассматриваемый комбинированный цикл может быть использован в высокооборотных детандерных ступенях при любых соотношениях начального и конечного давлений, размерах цилиндров и относительных мертвых пространствах.

В табл. 1 приведены результаты расчетного анализа работы прямоточного детандера высокого давления с самодействующим впускным клапаном традиционного исполнения (вариант А) и с модернизированным клапаном (вариант Б). В соответствии с условиями эксплуатации конечное давле-

Таблица 1
Интегральные параметры ДПВ4.2-200/6-2 при работе с переменным конечным давлением

Параметр	Варианты исполнения впускного клапана							
	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
a , %	8		7		6		5	
$p_{k,\min}$, МПа	0,55		0,46		0,38		0,3	
m , кг/ч	272,2	271,9	272,3	271,9	271,5	271,1	271	270,6
T , К	148,5	148,6	145,6	145,6	142,6	142,6	139,3	139,3
$N_{\text{ход}}$, кВт	11,31	11,29	11,53	11,51	11,72	11,70	11,94	11,92
η_c	0,779		0,773		0,767		0,759	
C_2^*	0	0,0077	0	0,0077	0	0,0077	0	0,0077

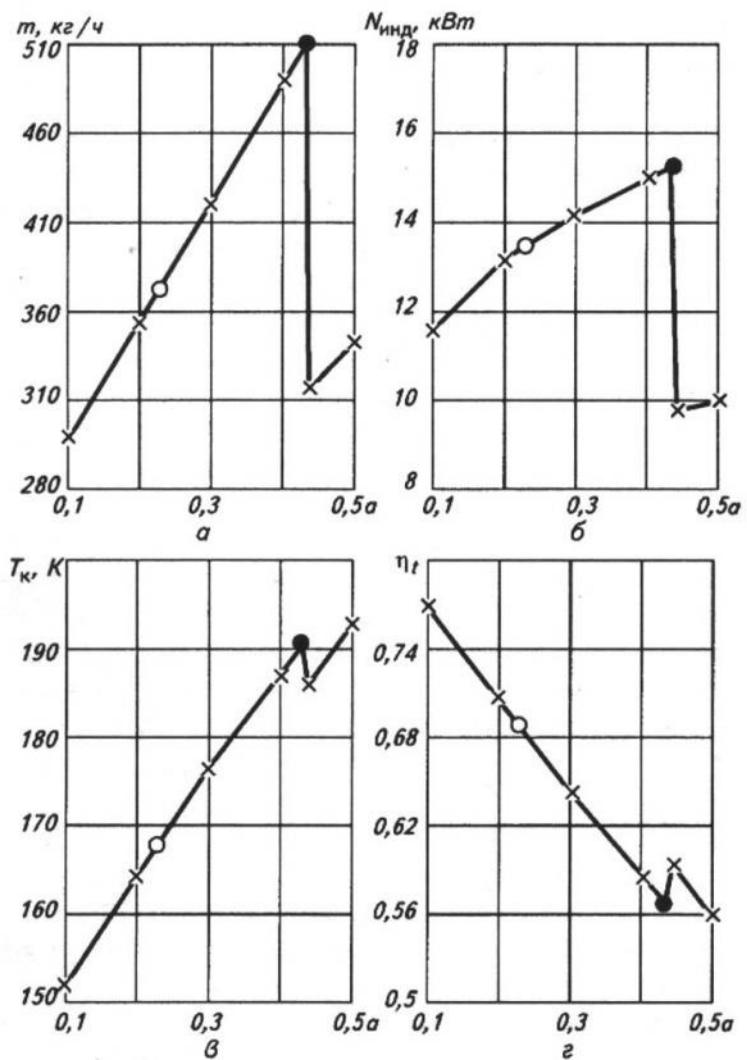


Рис. 3. Интегральные параметры детандерной ступени ДПВ4.2-200/6М с комбинированным рабочим циклом:
 $D = 55 \text{ мм}$, $S_n = 90 \text{ мм}$, $n = 400 \text{ об/мин}$, $p_h = 20 \text{ МПа}$,
 $p_k = 0,6 \text{ МПа}$, $T_k = 300 \text{ К}$, $h_{k1} = 0,8 \text{ мм}$, $h_0 = 3,2 \text{ мм}$,
 $S_2^* = 0,7 \text{ мм}$.

Ступень герметичная, без теплообмена

ние за детандером при расчетах задавали в диапазоне $0,3 \leq p_k \leq 0,6 \text{ МПа}$.

Из приведенных данных следует, что для обеспечения работоспособности детандера во всем диапазоне p_k при традиционном впускном клапане (вариант А) относительное мертвое пространство ступени должно быть не более 5 %, что невыполнимо при заданных параметрах ступени и конструкции клапана. Для обеспечения работоспособности детандера на режиме с пониженным p_k при эксплуатации приходится снижать начальное давление при сохранении $\Pi = p_h / p_k \approx \text{const}$. Применение комбинированного цикла (табл. 1, вариант Б) позволяет обеспечить стабильную работу детандера ($S_2^* > 0$) во всем диапазоне p_k при сохранении массового расхода газа m , индикаторной мощности $N_{\text{инд}}$ и конечной температуры газа за детандером T_k .

Комбинированный рабочий цикл представляется рациональным в пневмодвигателях и детандер-

ных ступенях ДГА, когда главным фактором становится мощность, передаваемая на вал агрегата. Одним из возможных и практически осуществимых способов повышения индикаторной мощности ступени с комбинированным рабочим циклом является плавное или дискретное изменение относительного мертвого пространства ступени a .

Результаты расчетного анализа, приведенные на рис. 3,а, показывают, что в ступени с комбинированным рабочим циклом массовый расход газа практически пропорционален величине a . При этом на кривой $m = f(a)$ следует выделить две характерные точки:

- – процесс впуска заканчивается в момент прихода поршня в ВМТ при давлении, равном начальному p_h , после чего следует процесс наполнения;

- – процесс впуска заканчивается после прохождения поршнем ВМТ при давлении ниже начального, что приводит к преждевременному закрытию впускного клапана и к снижению давления в начале процесса расширения. Вследствие этого при $a \approx a^*$ отсутствует процесс наполнения, что приводит к резкому снижению расхода газа m через ступень, рабочий цикл которой становится аналогичным циклу бесклапанного детандера [1].

Интенсивность нарастания индикаторной мощности детандерной ступени $N_{\text{инд}}$ с увеличением a постепенно убывает (рис. 3,б). Учитывая характер функций $m = f(a)$ и $N_{\text{инд}} = f(a)$, можно сделать вывод, что удельный расход газа $m_{\text{уд}} = m / N_{\text{инд}}$ на выработку 1 кВт мощности при работе детандерной ступени в составе ДГА в качестве источника

Таблица 2
 Параметры ДПВ4.2-200/6М при переменной величине S_2^*

Параметр	Относительное мертвое пространство ступени a , %					
	12			23		
S_2^* , мм	0,3	0,5	0,7	0,3*	0,5	0,7
h_{k1} , мм	–	0,8	–	–	0,8	–
h_0 , мм		3,2	–		3,2	–
m , кг/ч	302,9	302,2	301,6	118,2	372,2	371,5
T , К	153,9	154	154	151,6	167,7	167,8
$N_{\text{инд}}$, кВт	12,13	12,1	12,07	4,74	13,51	13,47
η_t	0,762	0,761	0,761	0,774	0,69	0,689
C_2^*	0,0033	0,0055	0,0077	0,0033	0,0055	0,0077
C_2	0,2341	0,2337	0,2333	0,0033	0,2091	0,2087

* Работа детандерной ступени с преждевременным закрытием впускного клапана.

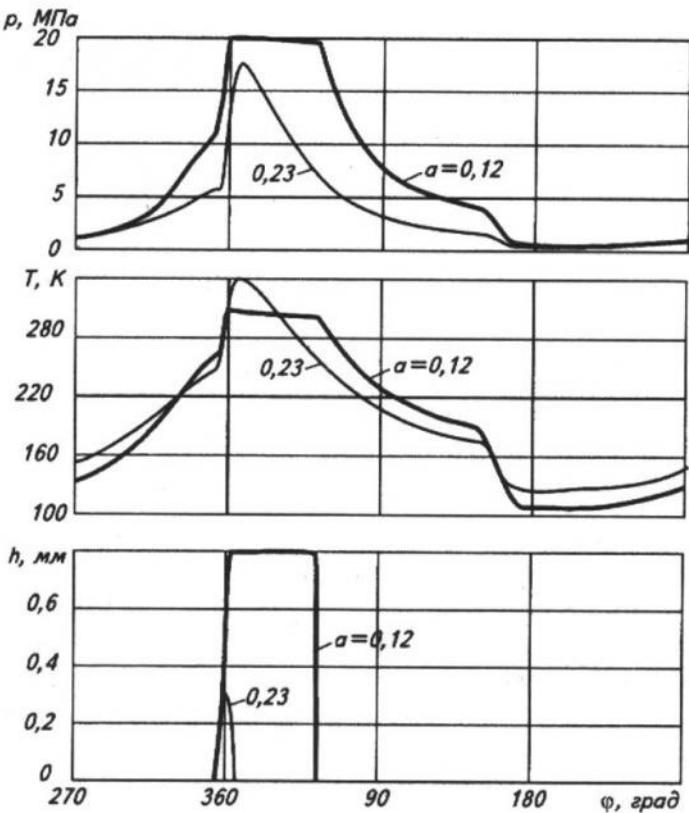


Рис. 4. Текущие параметры детандерной ступени ДПВ4.2-200/6М с комбинированным впускным клапаном при переменном мертвом пространстве:
 $h_{\text{кл}} = 0,8 \text{ мм}$, $h_o = 3,2 \text{ мм}$, $S_2^* = 0,3 \text{ мм}$

механической работы с увеличением a будет прогрессивно нарастать. При этом увеличивается конечная температура газа на выходе из агрегата и снижается эффективность его работы (рис 3, в и г).

Исходя из этого, при проектировании ступеней с комбинированным рабочим циклом, предназначенными для работы в составе ДГА, следует найти и обосновать оптимальное сочетание величин относительного мертвого пространства a и температуры газа на входе в ступень T_h , при которых на заданном режиме работы (p_h, p_k, n) обеспечивается максимально возможная мощность на валу агрегата и необходимая по условиям эксплуатации температура газа (плюсовая !) на выходе детандерной ступени T_k .

Надежность работы детандерной ступени с комбинированным циклом в значительной степени определяется правильным выбором параметра S_2^* , величина которого задается в диапазоне $0 \leq S_2^* \leq h_{\text{кл}}$. При $S_2^* \rightarrow h_{\text{кл}}$ поршень соприкасается с толкателем пластины клапана с максимальной скоростью, что может приводить к его «расклепке» при эксплуатации. С другой стороны, при $S_2^* \rightarrow 0$ скорость соударения минимальна, но при заданной величине $a \leq a^*$ возникает опасность существенного снижения давления в цилиндре в конце процесса впуска и

преждевременного закрытия впускного клапана. Следовательно, на стадии проектирования должна решаться задача поиска и обоснования такой величины S_2^* , которая обеспечивала бы эффективность и надежность работы детандерной ступени.

В табл. 2 приведены интегральные параметры детандерной ступени, работающей по комбинированному циклу с перемещением толкателя пластины впускного клапана в диапазоне $0,3 \leq S_2^* \leq 0,7 \text{ мм}$ при двух значениях величины относительного мертвого пространства a .

Текущие параметры ДПВ4.2-200/6М, поясняющие приведенные в табл. 2 результаты и соответствующие принудительному перемещению пластины клапана $S_2^* = 0,3 \text{ мм}$, приведены на рис. 4. Анализ полученных данных показывает, что оптимальное значение S_2^* , гарантирующее 6-фазный рабочий цикл при минимальных скоростях соударения поршня с толкателем в момент принудительного открытия впускного клапана при прочих одинаковых условиях, зависит от комплекса параметров. Среди них отметим основные: мертвое пространство ступени, частоту вращения вала, отношение давлений в начале и конце процесса впуска, а также свойства рабочей среды. Обоснование «оптимальной» величины S_2^* при проектировании не вызывает каких-либо затруднений при использовании созданной и апробированной автором прикладной программы расчета детандерной ступени.

В заключение хотелось бы отметить, что комбинированный рабочий цикл прямоточной детандерной ступени, рассмотренный в настоящей работе, по мнению автора, обладает рядом преимуществ и после проверки на соответствие расчетных данных экспериментальным может быть рекомендован для применения в поршневых расширительных машинах различного функционального назначения.

Список литературы

- Прилуцкий А.И. и др. Поршневой детандер. Патент № 2029911, 1995 г. БИ №6, 27.02.95. Заявка на А.с. 4765021/06, 1989.
- Прилуцкий А.И. и др. Состояние и перспективы создания прямоточных поршневых детандеров с самодействующими клапанами // Материалы МНПК «Криогенная техника – науке и производству». ЦИНТИХимнефтемаш, НПО «Криогенмаш», 1991.
- Прилуцкий И.К., Прилуцкий А.И. Расчет и проектирование поршневых компрессоров и детандеров на нормализованных базах / Учеб. пособие для вузов. – СПб.: СПБГАХПТ, 1995.
- Иванов Д.Н., Прилуцкий А.И. Математическое моделирование рабочих процессов бесклапанных поршневых машин / Межвузовский сб. науч. статей «Пути повышения эффективности процессов и оборудования низкотемпературной техники и пищевых технологий». – СПб.: СПБГАХПТ. – Деп. в ВИНТИ, 17.10.1996, № 3059-В96.

* Соответствует номинальной мощности, принятой при проектировании базы.