

УДК 621.59

Расчетный анализ работы газового поршневого детандера на режимах регулирования

А. А. РЫЖКОВ, Ю. И. МОЛОДОВА, А. И. ПРИЛУЦКИЙ,

д-р техн. наук И. К. ПРИЛУЦКИЙ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

The numerical experiment of rapidly CH₄ piston (reciprocating) expander on different control modes is performed. The three-circular intake valve with movable restrain of the 1-st plate is analyzed to potential use in two-phase piston expanders. The spring preload control makes it possible to vary capacity of two-phase piston expander to a considerable extent. Meanwhile the outlet temperature is provided to be constant at level of $\approx 133,37$ K in wide range of intake parameters.

Keywords: two-phase reciprocating CH₄ expander, pulling of intake valve plate, moving plate restraint, capacity control.

Ключевые слова: поршневой парожидкостной газовый детандер, отжим пластины впускного клапана, регулирование производительности.

В условиях эксплуатации периодически возникает необходимость работы детандеров на режимах, отличных от расчетного (номинального) режима. В большинстве случаев при сохранении начальной температуры и давления газа на входе и выходе детандера требуется обеспечить переменный расход газа, поступающего к потребителю, при сохранении конечной температуры на постоянном уровне. Существующие методы регулирования расхода газа в агрегатах с постоянной частотой вращения вала основаны на изменении продолжительности процесса наполнения, что сопровождается отклонением конечной температуры газа за детандером от расчетной величины в ту или иную сторону.

В статье представлен расчетный анализ работы прямоходной детандерной ступени среднего давления, работающей на природном газе и укомплектованной самодействующим впускным клапаном. В качестве объекта исследования выбран многорядный поршневой детандер, спроектированный на 3-х рядной вертикальной базе с допустимым усилием по рядам 3,0т.

Основные геометрические и режимные параметры исследуемого детандера приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные геометрические и режимные параметры детандера

Рабочее вещество	Метан
Начальное давление	5 МПа
Конечное давление	0,45 МПа
Начальная температура газа	220 К
Диаметр цилиндра	90 мм
Ход поршня	110 мм
Частота вращения вала	980 об /мин
Относительная длина шатуна	0,25
Мертвый объем	13,5%
Окна	∅ 6 – 32 шт (2 ряда, $C_3 = 0,845$)

По оси торцевой крышки каждого из цилиндров детандера установлен кольцевой нормально-открытый впускной клапан с тремя концентрично расположенными пластинами (см. рис. 1). Для обеспечения работоспособности детандера в широком диапазоне начального давления в конструкцию клапана предусмотрены толкатели 2, встроенные внутрь клапанных пружин. Толкатели направляют и обеспечивают принудительное перемещение клапанных пластин на величину $0 < h_{\text{кл}}^* < h_{\text{кл}}$ на нерасчетных режимах при положении поршня вблизи ВМТ; здесь $h_{\text{кл}}$ — максимально возможная высота подъема пластин, предусмотренная в конструкции клапана. Регулирование высоты подъема первой пластины осуществляется при помощи подвижного ограничителя 4, позволяющего производить изменение предварительного натяга пружин без разборки клапана. Конструкция клапана обеспечивает постоянство суммы предварительного натяга пружины и высоты подъема пластин $h_0 + h_{\text{кл}} = 3,8 \text{ мм} = \text{const}$.

Выхлопные окна ступени выполнены по двухрядной схеме со смещением отверстий по рядам на величину $\Delta = d_0 + a_0$; здесь d_0 и a_0 — диаметр отверстий и расстояние между ними соответственно.

Целью настоящей работы явилось:

1. Получение расчетным путем текущих и интегральных параметров детандерной ступени, работающей в парожидкостной области с одноклапанным газораспределением, при изменении натяга пружины первой пластины впускного клапанов h_0 , величина которого при заданной жесткости пружин принималась в диапазоне $3 \leq h_0 \leq 3,75 \text{ мм}$;

2. Анализ полученных результатов и оценка целесообразности применения отжима пластин впускных клапанов на детандерах рассмотренного типа в условиях эксплуатации.

В ходе численного эксперимента использовалась программа КОМДЕТ, созданная на кафедре криогенной техники и используемая в проектно-конст-

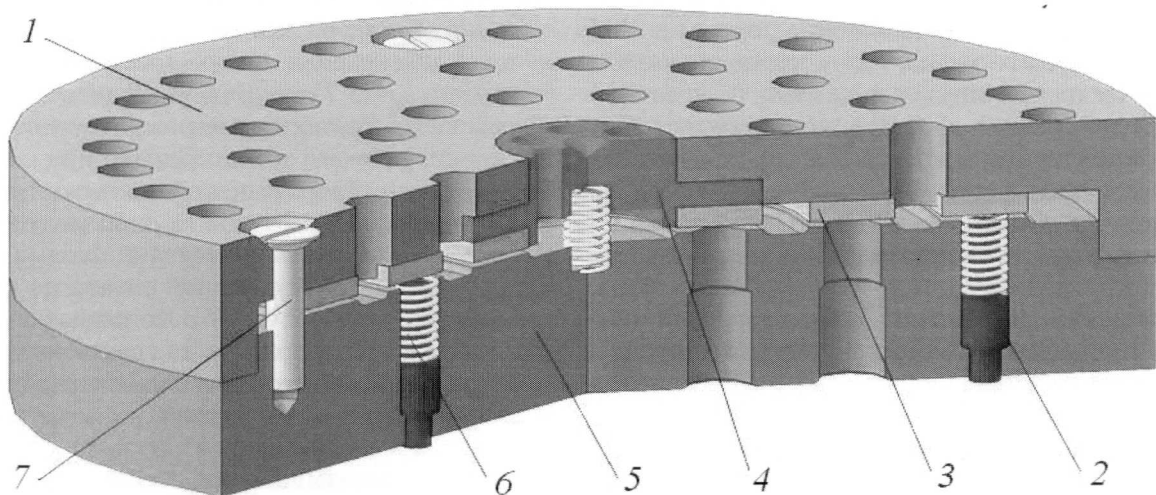


Рис. 1. Клапан впускной трехколевой, нормально-открытый с промежуточным подвижным ограничителем первой пластины: 1 — ограничитель; 2 — толкатель; 3 — пластина; 4 — ограничитель подвижный; 5 — седло; 6 — пружина; 7 — крепежный винт

рукторских подразделениях ряда фирм, связанных с разработкой поршневых компрессоров (КОМ) и детандеров (ДЕТ).

При расчетах было сделано допущение о герметичности детандерной ступени — зазоры в клапане

и в уплотнительном узле отсутствуют, клапан работает без толкателей. Расчеты производились с учетом реальных свойств рабочего агента [1–3].

Для упрощения результатов расчетного анализа, показанных на рис. 2, введем обозначения

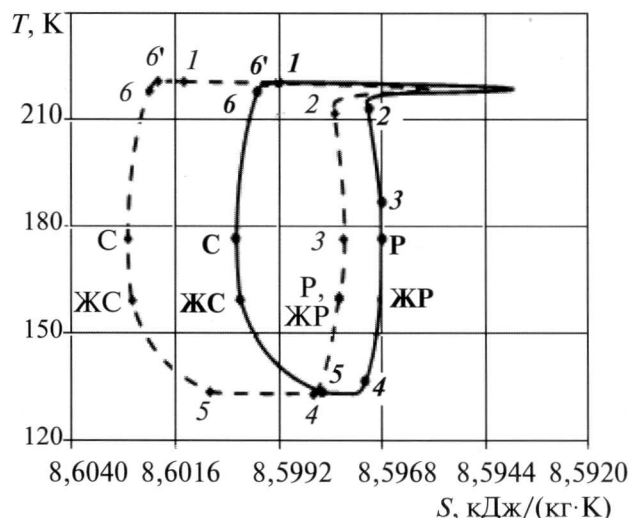
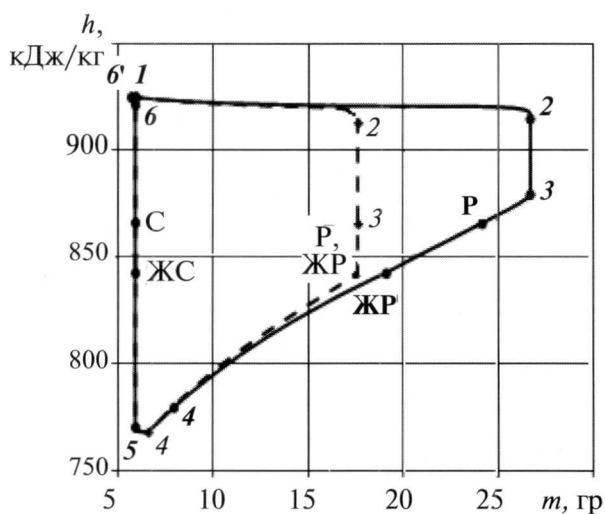
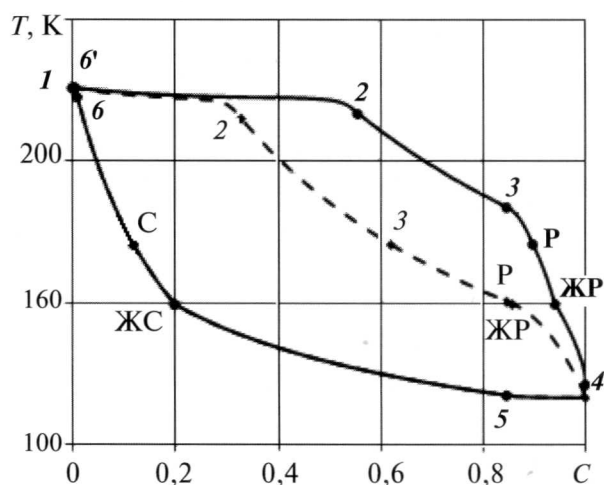
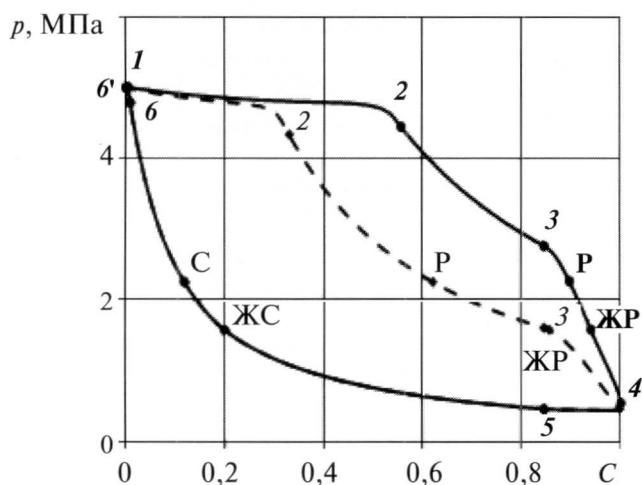


Рис. 2. Текущие параметры ступени в зависимости от относительного хода поршня:

— при $h_0 = 3,0$ мм; - - - - при $h_0 = 3,75$ мм

характерных точек и основных процессов рабочего цикла детандера: 1 — положение поршня в ВМТ (впускной клапан открыт); 1–2 — процесс наполнения; 2 — закрытие впускного клапана (начало процесса расширения 2– p –3); Р — точка, соответствующая равенству температур газа и стенок цилиндра в процессе расширения; 3 — момент начала открытия выхлопных окон; 3–ЖР–4 — процесс выхлопа; ЖР — точка, соответствующая началу перехода рабочего вещества из газового в паро-жидкостное состояние; 4 — положение поршня в НМТ (выхлопные окна полностью открыты); 4–5 — процесс вытеснения расширившегося газа; 5 — момент закрытия выхлопных окон (начало процесса сжатия 5– $c_{ж}$ – c –6); ЖС — точка, соответствующая обратному переходу рабочего вещества из паро-жидкостного в газовое состояние; С — точка, соответствующая равенству температур газа и стенок цилиндра в процессе сжатия; 6 — окончание процесса сжатия при $p_6 < p_H$ (момент начала открытия впускного клапана); 6–6' — процесс впуска (кратковременный в рассматриваемом случае); 6' — момент равенства давлений в цилиндре и впускной полости ($p_6 = p_H$); 6'–1 — процесс нагнетания (кратковременный в рассматриваемом случае); ЖР–4–5–ЖС — участок цикла, соответствующий паро-жидкостному состоянию рабочего вещества с различной степенью сухости x .

На рис. 2 показаны совмещенные диаграммы текущих параметров детандерной ступени. При натяге клапанных пружин $h_0 = 3$ мм режим работы детандера соответствует номинальному, при котором обеспечивается максимальный расход газа

$m_{ном}$ и требуемая конечная температура T_k . Текущие параметры ступени при пониженном расходе газа m' показаны красным цветом и соответствует натягу пружин $h_0 = 3,75$ мм. В обоих вариантах часть рабочего цикла протекает в паро-жидкостной области состояния рабочего агента. Однако при номинальном режиме рабочее вещество на выходе из ступени находится в однофазном газовом состоянии, так как процесс образования жидкой фазы в рабочей камере начинается во второй половине процесса выхлопа $C_{жр} = 0,94$ ($C_3 = 0,85$). Конечные параметры реального рабочего вещества на выходе из детандера определяются по среднemasсовой энтальпии в процессах выхлопа и вытеснения:

$$— \text{конечная энтальпия газа } h_k = \frac{\sum (h_{ц} \Delta m_{3-5\Delta\varphi})}{\sum \Delta m_{3-5\Delta\varphi}};$$

$$— \text{конечная температура } T_k = f(p_k, h_k).$$

При режиме, соответствующему максимальному натягу пластины $h_0 = 3,75$ мм, на выходе из детандера содержание жидкой фазы в метане составляет 4,43%.

Полученные данные дают наглядное представление о том, что увеличение натяга клапанных пружин приводит к уменьшению длительности процесса наполнения 1–2 и как следствие к увеличению продолжительности процесса расширения 2–3. Температура рабочего вещества в конце процесса расширения (точка 3) значительно уменьшается, что приводит к тому, что начало образования жидкой фазы (точка ЖР) начинается практически сразу после точки 3. И на выходе из ступени образуется паро-жидкостная смесь.

Таблица 2

Интегральные параметры детандерной ступени при отжиге внутренней пластины 3-х кольцевого впускного клапана

Параметр	Перемещение подвижного ограничителя H_0 , мм				
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,75
$h_{0,1}$, мм	3,0	3,2	3,4	3,6	3,75
$h_{кл1}$, мм	0,8	0,6	0,4	0,2	0,05
T_k , К	133,6	133,4			
C_2	0,5557	0,4924	0,4284	0,3712	0,3294
p_4 , МПа	0,556	0,512	0,478	0,456	0,450
T_4 , К	137,2	135,7	134,4	133,6	133,4
p_{min} , МПа	0,451	0,450			
T_{min} , К	133,4				
$C_{жр}$	0,9400	0,9266	0,9098	0,8868	0,8562
$T_{жр}$, К	160,0		159,9		
$C_{жс}$	0,1989		0,1993	0,1996	0,2012
$T_{жс}$, К	159,8				159,6
$V_{н.у}$, м ³ /мин	30,537	26,590	23,020	19,665	17,223
$N_{инд}$, кВт	32,201	29,734	27,135	24,350	22,093 ↓
m , кг/ч	1224,83	1066,5	923,33	788,76	690,79 ↓
h_k , кДж/кг	826,74	821,01	815,62	810,34	806,24 ↓
η_s	0,611	0,648	0,683	0,717	0,743 ↑
X_k	1,0	0,989	0,977	0,966	0,957
$\sigma = m_i/m_1$	1,0	0,871	0,754	0,644	0,564

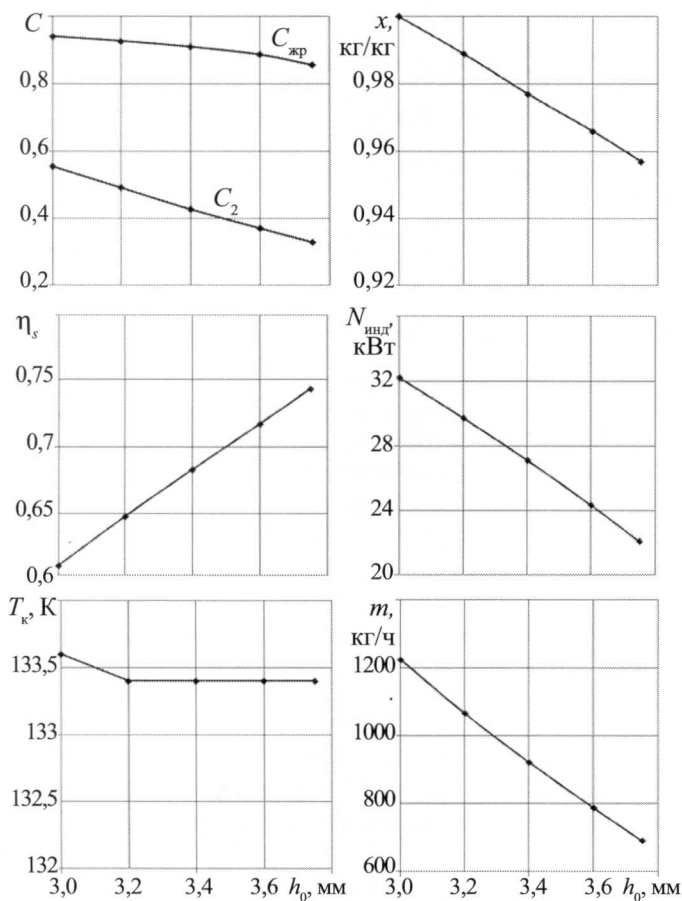


Рис. 3. Интегральные параметры метанового поршневого детандера среднего давления в зависимости от предварительного натяга пружин первой пластины впускного клапана

Изменение предварительного натяга пружин впускного клапана не влияет на процессы, протекающие на обратном ходу поршня: вытеснения 4–5 и обратного сжатия 5–6.

Изменение интегральных параметров ступени в зависимости от увеличения натяга клапана представлено на рис. 3 и в табл. 2.

Отношение $\sigma = m'/m_{\text{ном}}$ характеризует степень снижения расхода газа при произвольно заданном в условиях эксплуатации натяге пружин. В рассматриваемом диапазоне $3 < h_0 \leq 3,75$ расход газа снижается со 100 до 56,4%, а индикаторная мощность $N_{\text{инд}}$ уменьшается на 31,4%, изоэнтальпийный КПД детандера увеличивается с 0,61 до 0,74%. При этом температура стенок рабочей камеры $T_{\text{ст}}$ и конечная температура газа за детандером $T_{\text{к}}$ остаются практически постоянными. При номинальном режиме работы конечная температура $T_{\text{к}}$ составляет 133,6 К. Однако, уменьшая продолжительность наполнения ступени путем отжима пластины с наименьшим диаметром, рабочий агент переходит во влажно-паровое состояние, с постоянной температурой $T_{\text{к}}$ в широком диапазоне изменения параметров состояния в начале процесса расширения.

Анализ работы впускного клапана показывает, что в диапазоне изменения $h_0 = 3,0 \dots 3,75$ мм динамика движения пластины остается без качественных изменений (рис. 4).

Клапан характеризуется завышенными скоро-

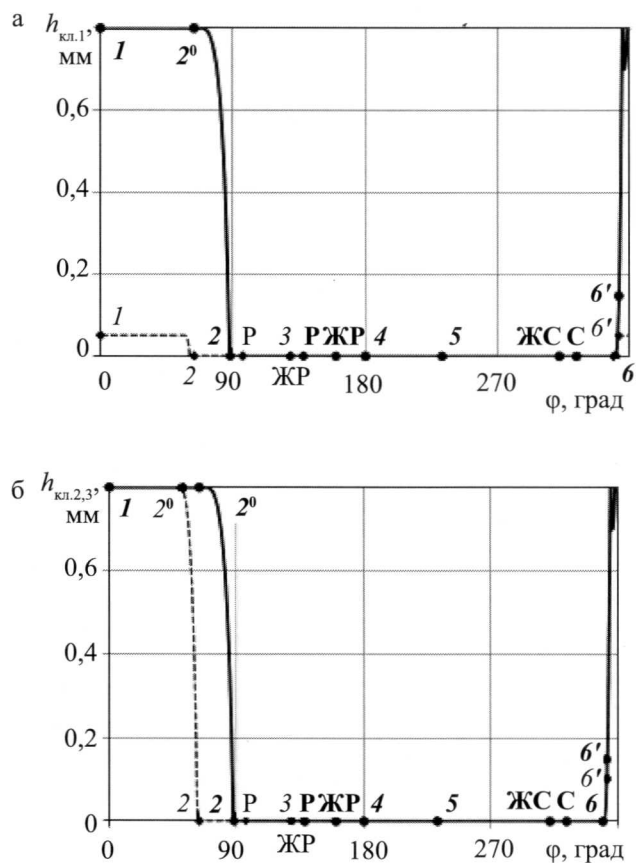


Рис. 4. Высота подъема пластин клапана: а — 1-я пластина; б — 2-я и 3-я пластина; — — — при $h_0 = 3,0$ мм, - - - - при $h_0 = 3,75$ мм

стями посадки пластины на номинальном режиме работы. С уменьшением продолжительности процесса наполнения, увеличиваются скорости посадки пластины на седло и ограничитель.

Выводы

Предложенный метод регулирования показывает возможность изменения производительности детандера в широком диапазоне режимных параметров при сохранении конечной температуры на постоянном уровне $T_{\text{к}} = 133,37$ К, при этом данное техническое решение отличается простотой конструкции.

Список литературы

1. Кузнецов Л. Г., Иванов Д. Н., Молодова Ю. И., Прилуцкий И. К. Обобщенная математическая модель рабочих процессов ступени машин объемного действия // Компрессорная техника и пневматика. 2000. № 1.
2. Теплофизические свойства криопродуктов: Учеб. пособие для вузов./Л. А. Акулов, Е. И. Борзенко, В. Н. Новотельнов, А. В. Зайцев. — СПб.: Политехника, 2001.
3. Рыжков А. А., Иванов Д. Н., Молодова Ю. И., Прилуцкий А. И., Прилуцкий И. К. Сравнение методик расчета свойств веществ в газовой и парожидкостной области рабочих циклов машин объемного действия // Компрессорная техника и пневматика. 2011. № 8.