

УДК 534.282

Практическое использование программы КОМДЕТ-М для оптимизации конструкции поршневых компрессоров

Маковеева А.С., Прилуцкий А.И.

Прилуцкий А.А., Климов П.Ю.

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Описываются основные этапы проектирования машин объемного действия (МОД), отмечаются достоинства и недостатки существующих методик при проведении поверочных и специальных расчетов. Отмечены возможности разработанной на кафедре криогенной техники НИУ ИТМО математической модели и прикладной программы расчета КОМДЕТ-М по анализу протекающих рабочих процессов в МОД, их взаимосвязь с конструкцией объекта исследования и оценкой достигнутого на стадии проектирования уровня технико-экономических показателей объекта исследования. Приведена иллюстрация возможности применения программы КОМДЕТ-М для выявления причин неудовлетворительной работы машин объёмного действия и комплектующих узлов, выявленных в условиях эксплуатации с оптимизацией конструкции органов газораспределения, при которой достигается снижение температуры нагнетаемого газа, улучшение динамики перемещения пластин клапанов и улучшение технико-экономических показателей МОД в целом.

Ключевые слова: математическая модель, термодинамический расчет, машина объемного действия, клапан, оптимизация конструкции.

The practical use of a KOMDET-M program for piston compressors structural optimization

Makoveeva A.S., Prilutsky A.I.

Prilutsky A.A., Klimov P.Yu.

University ITMO

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

This article describes the main phases of volumetric machines (VM) project, points out the advantages and disadvantages of existing techniques during the calibration and special calculations. The software features of the KOMDET-M application program and mathematical model for process analysis in volumetric machines, their interconnection with a design of a target of research and assessment of the level of technical-and-economic indexes for the target of research which has been achieved at the design stage are described in detail. The possibility of using the KOMDET program is shown to identify the causes of improper volumetric machines and associated parts performance, identified in operating conditions with the valve gear structural optimization that achieves the injected gas temperature reduction, improvement of the valve plate dynamics and overall improvement of technical-and-economic indexes of volumetric machines.

Keywords: mathematical model, thermodynamic calculation, volumetric machines, valve, structural optimization.

схем исполнения агрегата, состоящий из следующих основных этапов:

1. Предварительный термодинамический и конструктивный расчет, в ходе которого выбирается стандартная база, обосновывается в первом приближении схема размещения ступеней по рядам, диаметры цилиндров, тип и количество клапанов, определяются основные технические параметры. Следует отметить, что при всем разнообразии существующих инженерных методик расчета они имеют один общий недостаток, суть которого заключается в следующем: методики во многом базируются на ранее полученных эмпирических данных (показатели политроп, составляющие коэффициента подачи, зазоры между рабочими полостями и др.), характерных для низкооборотных компрессоров и детандеров.

2. Поверочный расчет МОД на ЭВМ при использовании существующих прикладных программ, целью которого является уточнение параметров ступеней при фактических мертвых пространствах в ступенях с учетом особенностей конструкции выбранных клапанов и способа их размещения в цилиндрах, определение в первом приближении требуемых объемов и диаметров патрубков полостей всасывания (нагнетания), удовлетворяющих требованиям заказчика по амплитуде и частоте колебаний давления в них в условиях эксплуатации, фактических промежуточных давлений и газовых сил по рядам, температур нагнетаемого газа по ступеням, а также обоснование эффективности и минимальной степени сложности реализации принятого способа изменения производительности в заданном диапазоне $X \leq \sigma \leq 1,0$ на режимах отличных от номинального.

3. Специальные расчеты (прочностные, газодинамические, механические, тепловые и процессы массопереноса) необходимые для обоснования работоспособности объекта исследования в широком диапазоне режимных параметров при заданных свойствах рабочего вещества и внешних условиях.

На основании полученных результатов создается информационная база, использование которой в разработанной на кафедре криогенной техники НИУ ИТМО математической модели и прикладной программе расчета КОМДЕТ-М дает возможность анализировать протекающие рабочие процессы в их взаимосвязи с конструкцией объекта исследования, а также оценивать достигнутый на стадии проектирования уровень технико-экономических показателей объекта исследования.

Программа расчета КОМДЕТ-М позволяет:

1. Анализировать работу МОД отличающихся:
 - назначением (компрессоры, детандеры, газовые и пневмодвигатели);
 - конструктивным исполнением механизмов движения, цилиндра ($\psi = S/D$), органов газораспределения, уплотнительных узлов, регулирующих устройств и примыкающих к цилиндру полостей ($d_{тр}$, $V_{п.вс-нг}$);
 - типом рабочих веществ (идеальный – реальный газ, газовые, паро-жидкостные и паро-воздушные смеси);
 - режимными параметрами ($p_{н-к}$, $T_{н-к}$, n , c_p , $\sigma = m_i / m_{ном}$);
 - организацией охлаждения и смазки элементов МОД.
2. Осуществлять визуальный контроль наперед заданного текущего параметра ступени в процессе итерационного счета.
3. Получать информацию о влиянии на работу объекта исследования одного из ряда взаимосвязанных и одновременно протекающих процессов, что невозможно в условиях натурального эксперимента.

4. Выводить на печать значительный объем информации в цифровой и графической форме, а именно:

– текущие значения давления, температуры, энтропии, энтальпии, сечения в клапанах и окнах, тепловые потоки и комплекс интегральных параметров ступени МОД, что позволяет делать обоснованные выводы о степени совершенства конструкции объекта исследования и протекающих рабочих процессов на стадии разработки с учетом реальных свойств рабочего вещества и заданного режима работы.

– текущие и интегральные параметры ступени МОД, выводящиеся на печать при использовании программы КОМДЕТ-М показаны на рис.1.

Адекватность модели подтверждена сторонними организациями, использующими прикладную программу расчета при разработке новых или модернизации существующих компрессорных и расширительных машин.

Данное исследование иллюстрирует возможность применения программы для выявления причин неудовлетворительной работы натуральных машин объемного действия и комплектующих узлов, выявленных в условиях эксплуатации.

Проведен комплекс расчетов, целью которых было выявление причин регулярного (2–4 раза в месяц) выходов из строя самодействующих клапанов, производства фирмы «Hoerbiger», установленных на первой и второй ступенях оппозитного, дожимающего, газового компрессорного агрегата с поршнями двойного действия японского производства сжимающего водородсодержащий газ, основные характеристики работы которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики компрессора

Параметр	1-ая ступень	2-ая ступень
Давление газа на всасывании, МПа	0,128	0,422
Давление нагнетания газа, МПа	0,5	1,57
Число цилиндров.	1	1
Диаметр цилиндра, мм	910	380
Содержание водорода в газе, %	24	45
Относительный объем мертвого пространства, %	8,1	12,3
Диаметр штока, мм	90	
Ход поршня, мм	340	
Частота вращения коленчатого вала, об/мин	370	

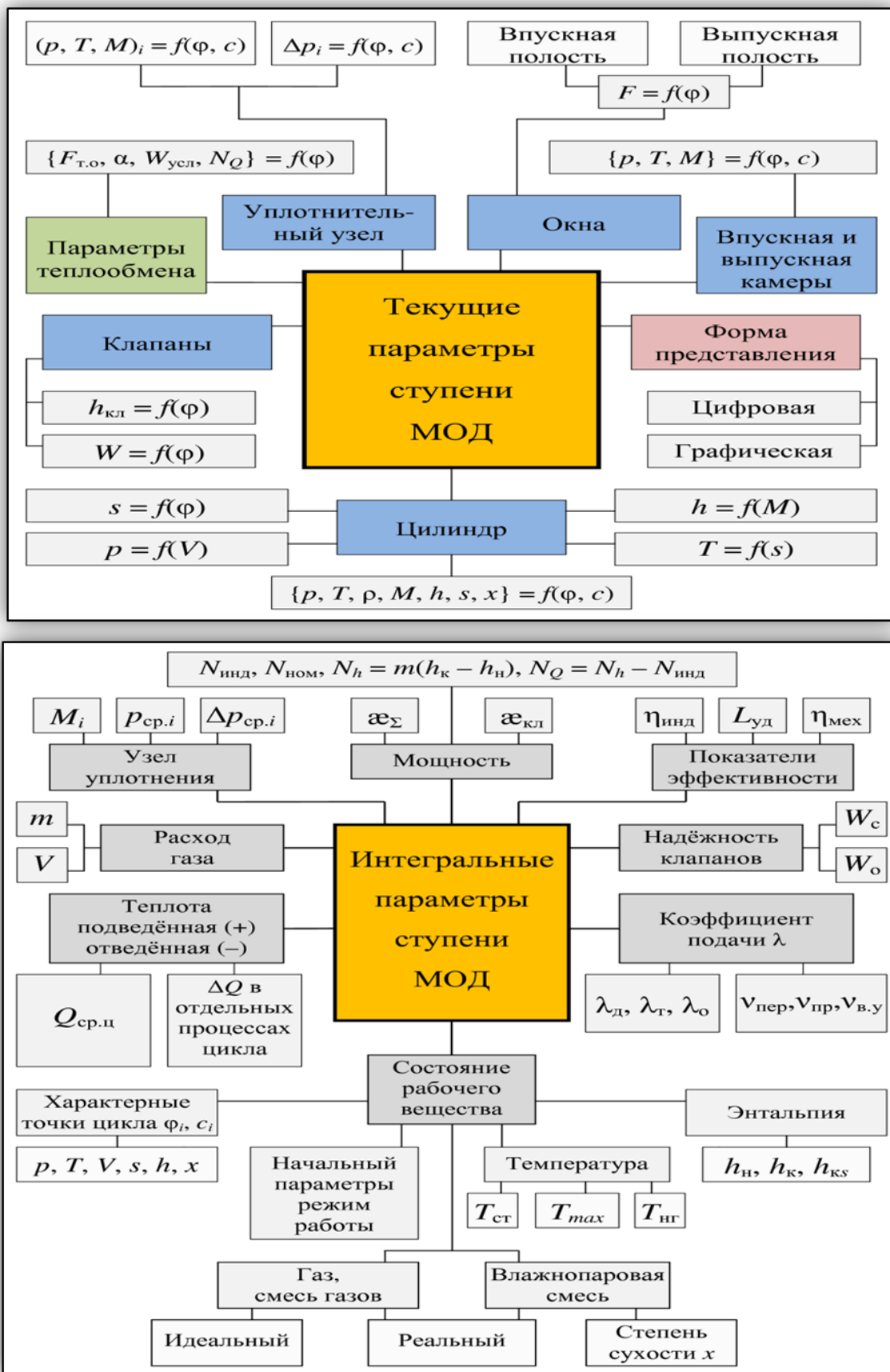


Рис. 1. Итоговая информация при использовании программы КОМДЕТ-М

Штатные клапаны первой и второй ступеней - кольцевые с двухсторонним проходом газа, пластины неметаллические, точечные пружины клапанов выполнены из нержавеющей проволоки. Основные параметры клапанов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Геометрические параметры клапанов

Параметр	Номер ступени сжатия	
	1	2
Посадочный диаметр клапана, мм	271	250
Количество пластин, шт	7	6
Толщина пластин, мм	6	6
Ширина пластин, мм	10	10
Жесткость пружин, Н/м	2511	3672
Высота подъема пластин, мм	2,7	2
Предварительный натяг пружин, мм	1,8	2
Количество пружин, шт	4; 4; 8; 8; 8; 8; 8	4; 8; 8; 8; 8; 8
Средний диаметр пластин, мм	59; 91; 123; 155, 187; 219; 251	70; 102; 134; 166; 198; 230

Анализ работы штатных клапанов первой и второй ступеней компрессорного агрегата показал, что частые их выходы из строя связаны с неудовлетворительной динамикой перемещения пластин, которая характеризуется многочисленными отскоками. Это приводит к преждевременной поломке пружин и пластин и, как следствие, выходу клапана из строя.

Анализ геометрических размеров пружин показал, что установленные пружины используются производителем в качестве типовых, их характеристики не просчитывались специально для данного клапана. Использование таких пружин в рассматриваемом случае препятствует удовлетворительной динамике перемещения пластин. Кроме того, для надежной работы клапана желательно выполнение условия примерно одинакового отношения среднего диаметра пластины к числу пружин, воздействующих на данную пластину. В рассматриваемом случае это условие не соблюдается.

На рис. 2, 3, 4, 5 представлены диаграммы перемещения 1-й пластины и пластины с наихудшей динамикой перемещения всасывающего и нагнетательного клапана в составе 1-й и 2-й ступеней компрессорного агрегата для полостей прямого и обратного действия.

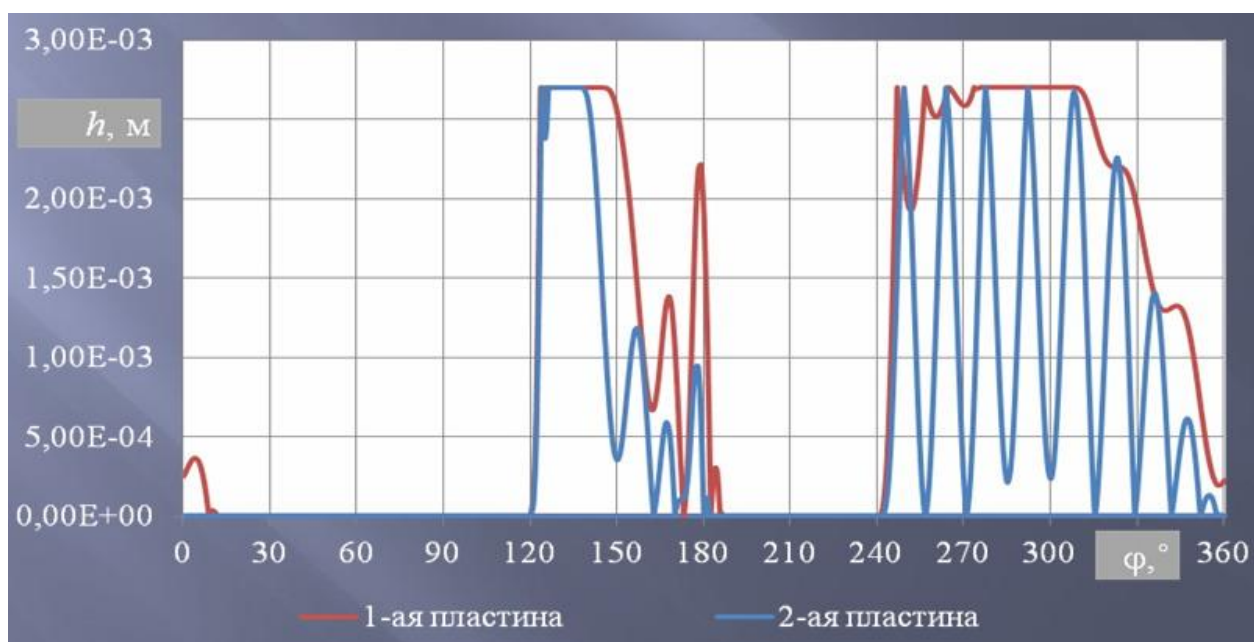


Рис. 2. Динамика перемещения 1-й и 3-й пластин всасывающего и нагнетательного клапана первой ступени полости прямого действия в базовом варианте

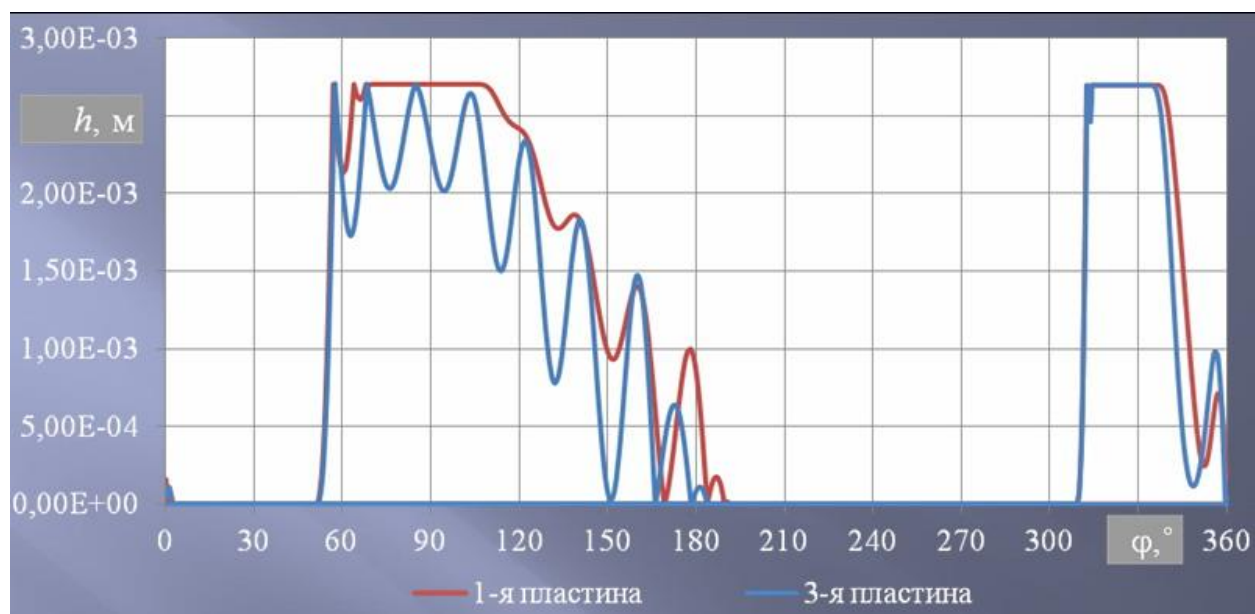


Рис. 3. Динамика перемещения 1-й и 2-й пластин всасывающего и нагнетательного клапана первой ступени полости обратного действия в базовом варианте

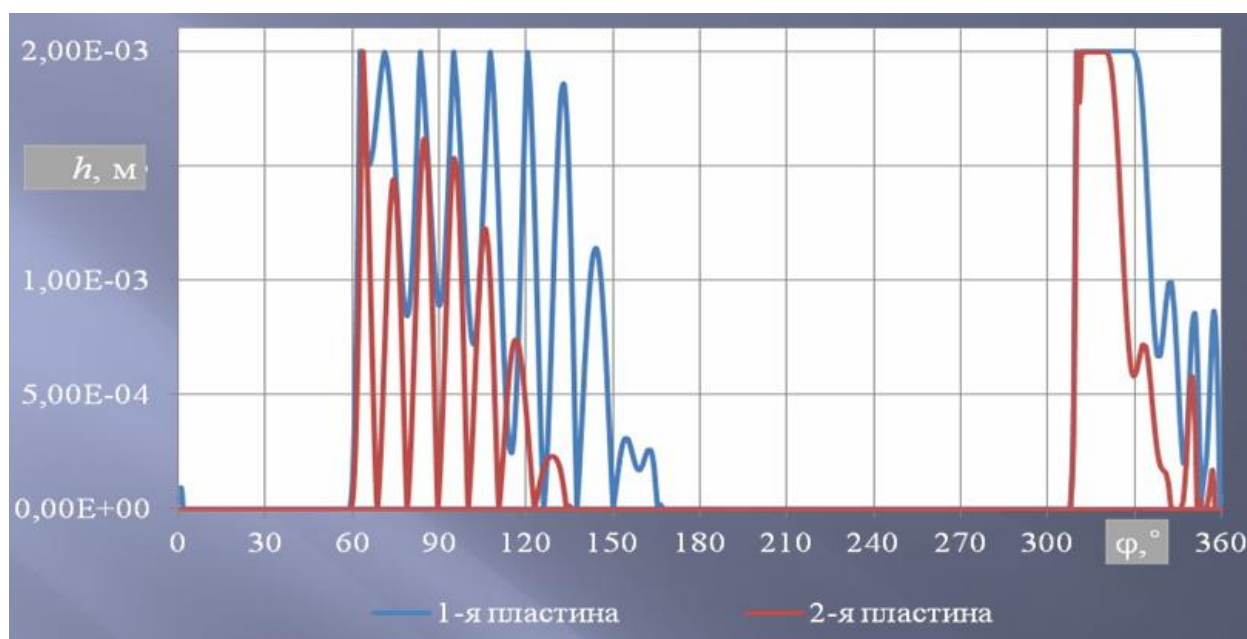


Рис. 4. Динамика перемещения 1-й и 2-й пластин всасывающего и нагнетательного клапана второй ступени полости прямого действия

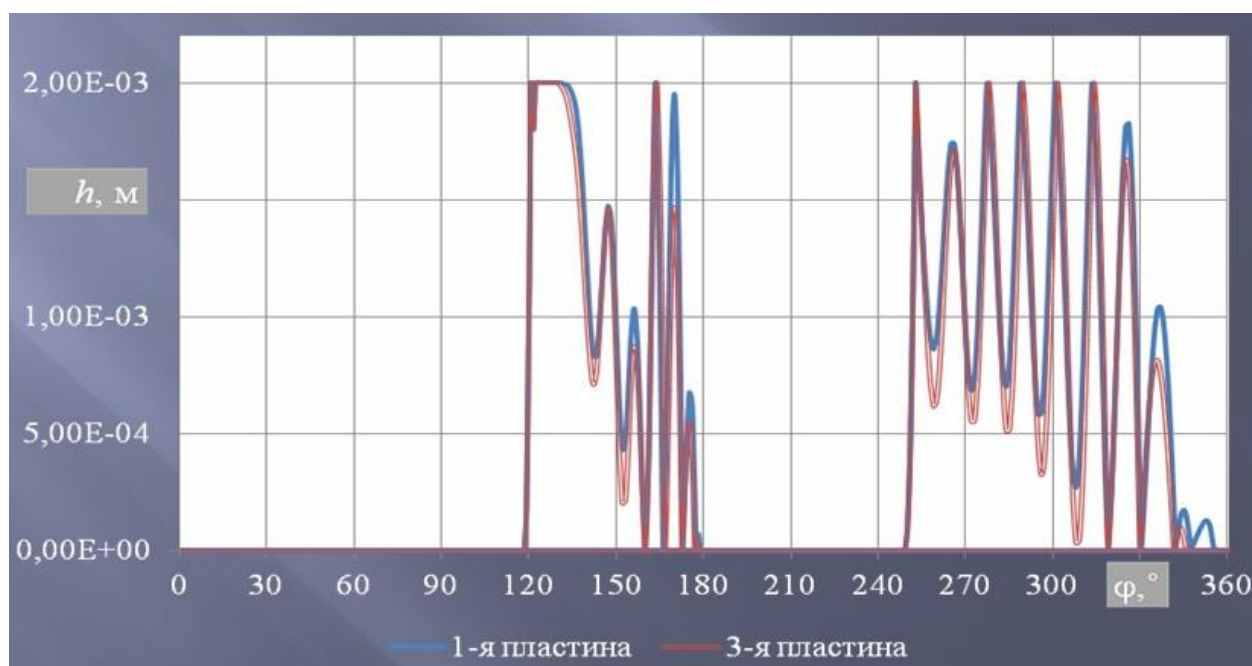


Рис. 5. Динамика перемещения 1-й и 3-й пластин всасывающего и нагнетательного клапана второй ступени полости обратного действия

Для обеспечения эффективной и надежной работы компрессорного агрегата, был проведен расчет штатных клапанов с целью оптимизации их конструкции с помощью программы КОМДЕТ-М. При этом найден вариант, позволяющий применять идентичные клапаны, как в полости прямого, так и обратного действия, несмотря на то, что шток компрессорного агрегата 2-й ступени занимает достаточно большой объем цилиндра ($d_{шт}=90$ мм, $D_{цп}=380$ мм), заключающейся в изменении жесткости пружин, их количества и предварительного натяга.

Основные параметры клапанов, измененные при их модернизации приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Модернизация штатного клапана в составе 1-й ступени

Параметр	Штатный клапан	Модернизированный клапан
Жесткость пружины, Н/м	2511	300
Количество пружин, шт	4; 4; 8; 8; 8; 8; 8	4; 6; 6; 7; 7; 8; 9
Предварительный натяг пружин, мм	1,8	2,5

На рисунках 6 и 7 приведены совмещенные диаграммы динамики перемещения пластин модернизированных клапанов первой и второй ступеней в полостях прямого и обратного действия.

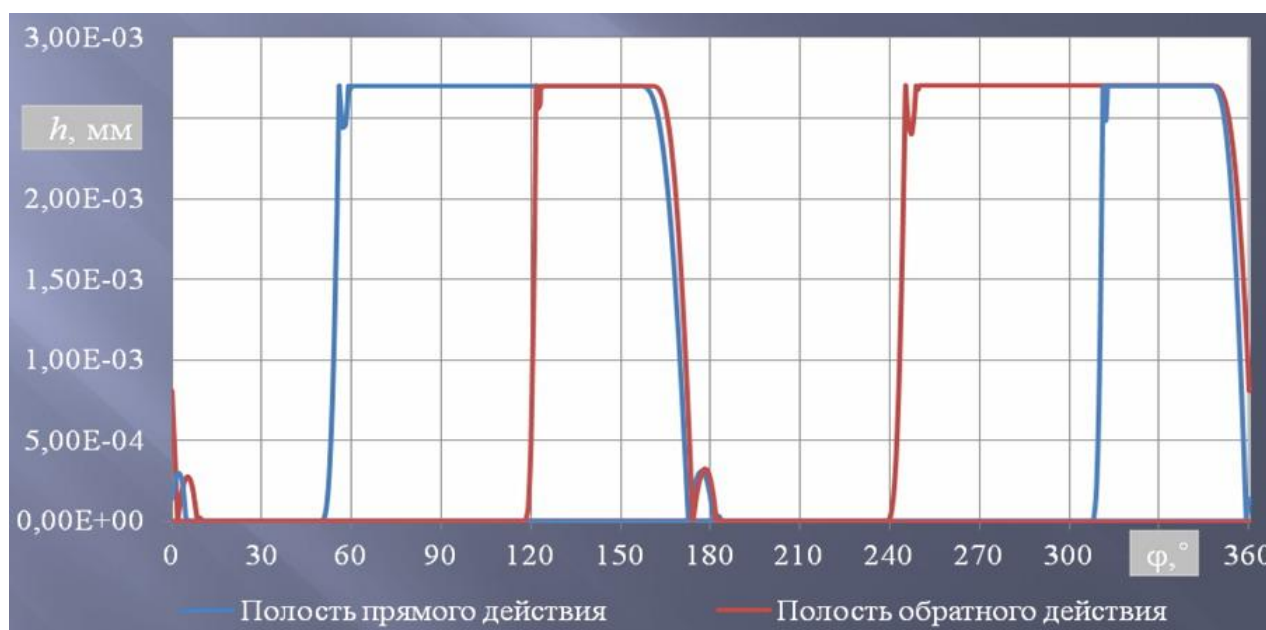


Рис. 6. Динамика перемещения пластин модернизированного всасывающего и нагнетательного клапана первой ступени полости прямого и обратного действия

Таблица 4

Модернизация штатного клапана в составе 2-й ступени

Параметр	Штатный клапан	Модернизированный клапан
Жесткость пружины, Н/м	3672	500
Количество пружин, шт	4; 8; 8; 8; 8; 8	3; 4; 5; 6; 8; 8
Предварительный натяг пружин, мм	2	0,7

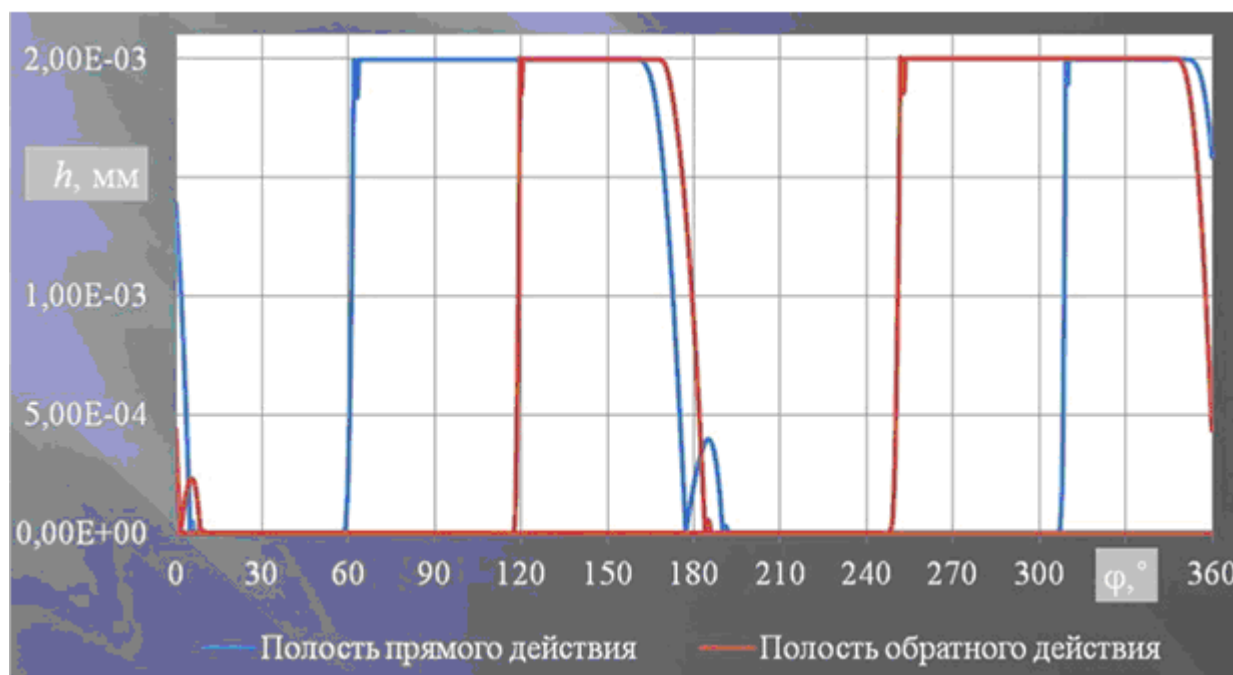


Рис. 7. Динамика перемещения 1-й пластины модернизированного всасывающего и нагнетательного клапана второй ступени полости прямого и обратного действия

Кроме этого, модернизация клапанов привела к увеличению эффективности работы компрессорного агрегата. Соответствующие данные представлены в таблице 5.

Таким образом, модернизация органов газораспределения гарантирует эффективную и надежную работу компрессорного агрегата, а также является экономически целесообразным мероприятием, которое, как показывают расчеты, имеет незначительный срок окупаемости и может приносить прибыль.

Таблица 5

Интегральные параметры штатных и модернизированных клапанов 1-й и 2-й ступеней для полости прямого действия

Интегральные параметры		1-ая ступень		2-ая ступень	
		Штатный клапан	Модернизированный клапан	Штатный клапан	Модернизированный клапан
Расход	m , кг/час	8214,51	7883,46	2743,37	2773,97
	V , м ³ /мин	75,95	72,89	39,70	40,14
Потери, %	всасывание	6,0	8,0	3,4	2,3
	нагнетание	3,9	4,1	1,7	1,5
Коэффициент подачи		0,75	0,78	0,71	0,72
$N_{инд}$, кВт		216,45	220,50	108,69	108,27
$N_{ном}$, кВт		193,07	200,62	103,45	104,34

Список литературы

1. *Арсеньев И.А., Иванов Д.Н., Прилуцкий А.И., Прилуцкий И.К., Рыжков А.А.* Учет реальных свойств рабочих веществ при моделировании процессов, протекающих в ступенях машин объёмного действия. Известия СПбГУНиПТ, №1, 2009.- с. 35-42
2. *Борзенко Е.И., Молодова Ю.И., Прилуцкий А.И., Прилуцкий И.К.* Анализ характеристик ступеней поршневых компрессоров при работе на различных газах. Ж. Технические газы, №1, 2013. - с. 62 - 68.
3. *Кондратьева Т.Ф., Исаков В.П.* Клапаны поршневых компрессоров. Изд. Машиностроение, Л., 1983. 158 с., ил.
4. *Прилуцкий И.К., Прилуцкий А.И., Иванов Д.Н., Арсеньев И.А., Рыжков А.А., Демаков А.С.* Оптимизация рабочих циклов, конструкций ступеней и комплектующих узлов компрессорных и расширительных машин объёмного действия Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012, - 64 с
5. *Пластинин П.И.* Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет. – 3-е изд., доп. – М.: КолосС, 2006. – 456 с.: ил.
6. Поршневые компрессоры // Фотин Б.С., Пирумов И.Б., Прилуцкий И.К., Пластинин П.И. Под ред. Фотина Б.С. Учебное пособие для ВУЗов. - Л.: Машиностроение. - 1987. - 372 с.
7. *Прилуцкий А.И.* Прогнозирование надежности и эффективности работы поршневых компрессоров. Материалы отраслевого совещания главных механиков нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий. (г. Кириши 5-9 декабря 2005 г). - с. 189-196.
8. *Прилуцкий А.И.* Совершенствование систем газораспределения компрессорных и расширительных машин. Дисс. на соиск. учен. ст. к.т.н. С.Пб. ГАХПТ, 1997 г.
9. *Прилуцкий А.И., Арсеньев И.А.* Повышение эффективности ремонта и модернизации поршневых компрессоров и детандеров путем применения методов математического моделирования. Доклад на отраслевом совещании главных механиков нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий. Москва, 30.XI. - 04.XII. 2009. -с.130-136
10. *Прилуцкий А.И., Прилуцкий И.К., Иванов Д.Н., Демаков А.С.* Теплообмен в ступенях машин объёмного действия. Современный подход // Компрессорная техника и пневматика. № 2, 2009. – с. 16 – 23.
11. *Прилуцкий И.К.* Разработка, исследование и создание поршневых компрессоров и детандеров для криогенной техники. /Дисс. д.т.н. – ЛТИХП. – СПб, 1991.
12. *Прилуцкий И.К., Прилуцкий А.И.* Расчет и проектирование поршневых компрессоров и детандеров на нормализованных базах. Учебн. пособие для ВУЗов. - СПб.: СПбГАХПТ, 1995. -194 с. ISBN 5-230-10678-6
13. *Френкель М. И.* Поршневые компрессоры.– Л.: Машиностроение , 1969. - 744 с.
14. *Колеснев Д.П., Молодов М.А., Прилуцкий А.А., Прилуцкий И.К.* Применение метода конечных объемов при расчетном анализе рабочих процессов поршневого детандера // Вестник Международной академии холода. 2012. № 1. с. 53.

References

1. Arsen'ev I.A., Ivanov D.N., Prilutskii A.I., Prilutskii I.K., Ryzhkov A.A. The accounting of real properties of working substances when modeling the processes proceeding in steps of cars of volume action. Izvestiya SPbGUNiPT, №1, 2009.- P. 35-42.

2. Borzenko E.I., Molodova Yu.I., Prilutskii A.I., Prilutskii I.K. The analysis of characteristics of steps of piston compressors during the work on various gases // *Zh. Tekhnicheskie gazy*, №1, 2013. - P. 62 - 68.
3. Kondrat'eva T.F., Isakov V.P. Valves of piston compressors // *Izd. Mashinostroenie, L.*, 1983. 158 p., il.
4. Prilutskii I.K., Prilutskii A.I., Ivanov D.N., Arsen'ev I.A., Ryzhkov A.A., Demakov A.S. Optimization of running cycles, designs of steps and the completing knots of compressor and broad cars of volume action of Studies. – SPb.: NIU ITMO; IKhiBT, 2012, - 64 p
5. Plastinin P.I. Piston compressors. Tom 1. Teoriya i raschet. – 3-e izd., dop. – M.: KolosS, 2006. – 456 p.: il.
6. Piston compressors// Fotin B.S., Pirumov I.B., Prilutskii I.K., Plastinin P.I. Pod red. Fotina B.S. Uchebnoe posobie dlya VUZov. - L.: Mashinostroenie. - 1987. - 372 p.
7. Prilutskii A.I. Forecasting of reliability and overall performance of piston compressors. Materialy otraslevogo soveshchaniya glavnykh mekhanikov neftepererabatyvayushchikh i neftekhimicheskikh predpriyatii. (g. Kirishi 5-9 dekabrya 2005 g). - P. 189-196.
8. Prilutskii A.I. Improvement of systems of gas distribution of compressor and broad cars. Diss. na soisk. uchen. st. k.t.n. S.Pb. GAKhPT, 1997 g.
9. Prilutskii A.I., Arsen'ev I.A. Increase of efficiency of repair and modernization of piston compressors and detander by application of methods of mathematical modeling. The report at branch meeting of chief mechanical engineers of the oil processing and petrochemical enterprises. Moscow, 30.Kh1. - 04.Kh11. 2009. - P.130-136
10. Prilutskii A.I., Prilutskii I.K., Ivanov D.N., Demakov A.S. Heat exchange in steps of cars of volume action. Modern approach. // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. № 2, 2009. – с. 16 – 23.
11. Prilutskii I.K. Development, research and creation of piston compressors and detander for cryogenic equipment. /Diss. d.t.n. – LTIKhp. – SPb, 1991.
12. Prilutskii I.K., Prilutskii A.I. Calculation and design of piston compressors and detander on the normalized bases. Uchebn. a grant for HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS. - SPb.: SPbGAKhPT, 1995. - 194 p. ISBN 5-230-10678-6
13. Frenkel' M. I. Piston compressors. – L.: Mashinostroenie, 1969. - 744 p.
14. Kolesnev D.P., Molodov M.A., Prilutskii A.A., Prilutskii I.K. Primenenie metoda konechnykh ob"emov pri raschetnom analize rabochikh protsessov porshneвого detandera // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2012. № 1. s. 53.