

14387627

Министерство высшего и среднего специального образования
СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени Высшее техническое училище
им. Н. Э. Баумана

На правах рукописи

РЫЖОВ Евгений Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВОГО РЕЖИМА МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ
КРИОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ МАШИН

(05.04.03 - гидравлические машины, машины и аппараты
холодильной и криогенной техники)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1981 г.

Министерство высшего и среднего специального образования
СССР
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени Высшее техническое училище
им. Н. Э. Баумана

На правах рукописи

РЫЖОВ Евгений Орьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВОГО РЕЖИМА МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ
КРИОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ МАШИН

(05.04.03 - гидравлические машины, машины и аппараты
холодильной и криогенной техники)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1981 г.

М 387624

НТБ МТУ им. Н. Э. Баумана



1387627

Рыжов Е. Ю. Исследование пус-

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена в Московском Ордена Ленина, Ордена Октябрьской революции и Ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
СУСЛОВ А.Д.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
ГРИГОРЕНКО Н.М.

кандидат технических наук,
ЗИНОВЬЕВ В.С.

Ведущее предприятие : НПО "ТЕЛИИМАШ"

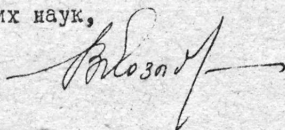
Защита диссертации состоится "18" января 1982 г. в 14 часов 00 мин. на заседании специализированного совета К.053.15.07 "Криогенные, холодильные, гидравлические, вакуумные и компрессорные машины и аппараты" МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу : 107005, Москва, Лефортовская набережная, д.1, корпус факультета "Энергомашиностроение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "1" декабря 1981 г.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу : 107005, Москва, 2-ая Бауманская ул., дом 5, специализированный Совет К.053.15.07.

Ученый секретарь
специализированного Совета
кандидат технических наук,
доцент



Козлов В.Н.

Актуальность темы. В настоящее время многоступенчатые криогенные газовые машины (КГМ) Стирлинга получили широкое распространение в различных областях науки и техники: радио- и оптоэлектронике, вычислительной технике, высоковакуумных системах и многих других областях. Такая популярность объясняется высокой эффективностью машин, минимальными габаритами и массой, сравнительно коротким пусковым периодом. Длительность последнего является одной из основных технических характеристик КГМ, а в ряде случаев становится определяющей при выборе типа криогенной машины. В первую очередь потребностями практики нужно объяснить возрастающее количество исследований пусковых режимов криогенных систем.

Вместе с тем, пусковой режим работы КГМ пока еще недостаточно изучен, практически отсутствуют публикации об исследовании пускового режима многоступенчатых КГМ. С другой стороны, длительность пускового периода у многоступенчатых КГМ в два-три раза больше, чем у одноступенчатых, что затрудняет решение ряда народнохозяйственных задач.

Все вышесказанное определяет актуальность исследования пускового режима работы многоступенчатых КГМ.

Цель работы. Состоит в исследовании пусковых режимов работы многоступенчатых КГМ, в выявлении и анализе факторов, влияющих на длительность пускового периода, в поиске путей улучшения пусковых характеристик.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- обоснована возможность использования математической модели пускового режима работы многоступенчатых КГМ, в которой элементы конструкции криогенной машины заменены сосредоточенными массами;
- впервые проведены исследования изменения внутренних и внешних параметров двухступенчатой КГМ в течение пускового режима работы;
- выявлено наличие оптимального времени включения тепловой нагрузки на ступени КГМ;
- впервые исследовано влияние геометрических размеров регенераторов и объемов рабочих полостей двухступенчатой КГМ на длительность пускового периода.

Результаты работы. Во-первых, разработана математическая модель пускового режима работы многоступенчатых КГМ, которая реализована в виде программы для ЭВМ ЕС 1033. Длительность расчета 10-

ти минутного пускового режима двухступенчатой КГМ не превышает одной минуты.

Во-вторых, выявлена возможность сокращения длительности пускового периода за счет изменения основных геометрических соотношений КГМ, за счет изменения конструкции теплообменника нагрузки и за счет выбора момента времени включения тепловой нагрузки на ступени КГМ. Рассмотрены примеры, иллюстрирующие возможные пути сокращения длительности пускового периода. За счет изменения отдельных геометрических параметров удается сокращать длительность пускового периода на 40%. Однако оптимизация по длительности пускового периода сопряжена со снижением КПД при работе машины на установившемся режиме. Выбор оптимального момента времени включения тепловой нагрузки сокращает длительность пускового периода на 40%.

В-третьих, предложен способ сокращения длительности пускового периода за счет охлаждения конструкции первой ступени криогенной жидкостью, которая подается в теплообменник нагрузки только в первые 15 секунд пускового режима. Длительность при этом сокращается в 2,0-2,5 раза. Полезный эффект достигается без увеличения мощности привода и массы всей КГМ, без снижения КПД при работе на установившемся режиме.

Практическая ценность. Выявлен и апробирован ряд мероприятий, позволяющий сократить длительность пускового периода на 15-30% по сравнению с выпускаемыми в настоящее время многоступенчатыми КГМ. Результаты исследований использованы при выполнении научно-технических тем кафедры, направленных на создание систем низкотемпературного термостатирования и могут быть использованы при создании новых типов КГМ с любым количеством ступеней, а также при разработке сложных криогенных систем, в которые КГМ входит как составная часть.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научно-технических семинарах кафедры "Криогенная техника и кондиционирование" ЛВТУ им. Н.Э.Баумана (1981 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении" (М., 1981 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 3 статьи.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и приложения. Работа изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок. Библиография

включает в себя 84 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ опубликованных работ.

В настоящее время существуют несколько основных методик по теоретическому расчету установившегося режима работы КГМ. Из всех рассмотренных методик наиболее целесообразным на данном уровне развития криогенной и вычислительной техники является методика, основанная на использовании метода дифференцированного анализа потерь, предложенная профессором А.Д.Сусловым и экспериментально проверенная при исследовании различных типов КГМ. Этот метод непосредственного определения влияния отдельных факторов на процессы, происходящие в КГМ, в данной работе получил дальнейшее развитие применительно к расчету пускового режима работы многоступенчатых КГМ.

В немногочисленных опубликованных работах, посвященных исследованию пускового режима работы одноступенчатых КГМ, предложены две математические модели. Первая модель основана на использовании зависимостей, полученных при расчете установившихся режимов работы по апробированным ранее методикам. В этом случае пусковой режим представляется как ряд дискретных квазиустановившихся циклов. В работе Ляпина В.И., Бахнева В.Г. и др. квазиустановившиеся циклы рассчитываются при помощи упрощенной методики Шмидта, а в работе Беякова В.В. использовалась методика дифференциального анализа потерь в цикле. Вторая модель пускового режима КГМ основана на математическом моделировании неустойчивых процессов, протекающих в течение пускового режима. К этому направлению относятся работы Новотельнова В.Н., Беякова В.В., Подольского А.Г.

Из анализа опубликованных работ следует, что использование предложенных методов расчета пускового периода одноступенчатых КГМ затруднено для расчета многоступенчатых машин. В работе Ляпина В.И. и др. помимо недостатков, свойственных методике Шмидта, при расчете весь перепад изменения температуры за пусковой период разбивается на равные интервалы и ищется время работы КГМ, за которое температура ступени достигает следующего интервала. Такую модель не удастся использовать для расчета пускового режима многоступенчатых КГМ. В работах Беякова В.В. в первой математической модели используются слишком упрощенные зависимости для расчета регенератора и предполагается использование заранее извест-

ной зависимости располагаемой холодопроизводительности от уровня термостатирования. Расчеты по второй модели требуют большого объема вычислительных работ на ЭВМ даже для одноступенчатых КГМ, что затрудняет использование этой модели для расчета многоступенчатых КГМ.

Совершенствование одноступенчатых машин базировалось на экспериментальных исследованиях. Возросшее число определяющих параметров для многоступенчатых КГМ сопряжено с многократным увеличением числа экспериментальных образцов. В данном случае наиболее рационально использовать математическое моделирование пускового режима.

Все вышеизложенное, а также отсутствие публикаций об исследовании пускового режима многоступенчатых КГМ предопределило задачи исследования:

- разработка математической модели пускового режима многоступенчатых КГМ и анализ влияния параметров КГМ на ее пусковой режим;
- поиск путей сокращения длительности пускового периода КГМ;
- экспериментальное исследование пускового режима работы двухступенчатой КГМ и сопоставление с результатами расчетов.

Во второй главе рассмотрен наиболее простой случай многоступенчатых машин - пусковой режим двухступенчатой КГМ. В предлагаемой математической модели пусковой режим представляется как непрерывный ряд дискретных квазиустановившихся циклов, в котором каждый последующий цикл отличается от предыдущего ступенчатым изменением температур первой T_{x1} и второй ступени T_{x2} .

Расчет каждого цикла, длительностью $\Delta\tau$, проводится на основе энергетических балансов ступеней:

$$\begin{aligned}\Delta\tau (Q_{x1} - Q_{o1}) &= \Delta Q_{K1} + \Delta Q_{A1}, \\ \Delta\tau (Q_{x2} - Q_{o2}) &= \Delta Q_{K2} + \Delta Q_{A2},\end{aligned}$$

где Q_{x1}, Q_{x2} - полезные холодопроизводительности ступеней;
 Q_{o1}, Q_{o2} - тепловыделения объектов охлаждения; ΔQ_{K1} ,
 ΔQ_{K2} - тепло, отводимое от конструкции ступеней; ΔQ_{A1} ,
 ΔQ_{A2} - тепло, отводимое от объектов охлаждения.

Полезная холодопроизводительность ступени КГМ находится при помощи метода дифференцированного определения потерь:

$$Q_x = Q_{xp} - \sum \Delta Q,$$

где $\sum \Delta Q$ - сумма потерь холодопроизводительности, вызванных не-

совершенством работы отдельных аппаратов.

Значения располагаемой холодопроизводительности ступени соответствуют величине теплового потока, непосредственно подведенного к циркулирующему внутри машины газу и равной индикаторной холодопроизводительности. Теплообмен газа со стенками цилиндра при этом не учитывается, а температуры газа, выходящего из теплообменных аппаратов, принимаются постоянными в течение цикла. Для КГМ с жесткой связью поршня и вытеснителя с механизмом движения:

$$Q_{хр} = Q_{хт} - \Delta Q_r ,$$

где $Q_{хт}$ - холодопроизводительность теоретического цикла; ΔQ_r - потери, вызванные гидросопротивлением аппаратов.

Изменение давления в цикле определяется из условия сохранения массы газа:

$$\frac{dp}{p} = -K \left(\frac{dV_1}{T_{п1}} + \frac{dV_2}{T_{п2}} + \frac{dV_k}{T_{пк}} \right) / \left(\frac{V_1}{T_{п1}} + \frac{V_2}{T_{п2}} + \frac{V_k}{T_{пк}} + K \frac{V_c}{T_c} \right) ,$$

где V_1, V_2, V_k - величины объемов детандерных и компрессорной плоскостей; $T_{п1}, T_{п2}, T_{пк}$ - температуры газа, вытекающего или натекающего в детандерные и компрессорную полости; V_c, T_c - суммарный объем и среднemasовая температура газа в теплообменных аппаратах; K - показатель адиабаты.

Суммарные потери холодопроизводительности для первой ступени:

$$\sum \Delta Q_1 = \Delta Q_{г1} + \Delta Q_{н1} + \Delta Q_{т1} + \Delta Q_{в1} + \Delta Q_{с1} + \Delta Q_{экp} - \Delta Q_{н2} - \Delta Q_{т2} - \Delta Q_{в2}$$

для второй ступени:

$$\sum \Delta Q_2 = \Delta Q_{г2} + \Delta Q_{н2} + \Delta Q_{т2} + \Delta Q_{в2} + \Delta Q_{с2}$$

где потери тепла вызваны: $\Delta Q_{н}$ - недорекуперацией в регенераторе; ΔQ_r - теплопритоком по конструкции; $\Delta Q_в$ - теплопереносом вытеснителем; ΔQ_c - передачей тепла излучением и остаточными газами через вакуумную изоляцию; $\Delta Q_{экp}$ - теплопритоками к экрану.

Экспериментальные исследования В.В.Белякова показали, что с достаточной точностью можно принять зависимость температуры конструкции по ее длине линейной:

$$\Delta Q_{к1} = B_1 \Delta T_{х1} ,$$

$$\Delta Q_{к2} = (A_2 - B_2) \Delta T_{х1} + B_2 \Delta T_{х2} ,$$

где B_1, B_2, A_2 - константы для каждого квазиустановившегося цик-

ла, зависящие от геометрических размеров конструкций, температур ступеней и теплоемкости материалов элементов конструкции; ΔT_{x1} , ΔT_{x2} - изменение температур ступеней за цикл. Зависимость теплоемкости материалов элементов конструкции КГМ от температуры конструкции аппроксимирована в виде полиномов третьей степени.

Для КГМ с теплообменниками нагрузки различие температур объекта охлаждения и головки цилиндра второй ступени не превышает 1-2 К. Для КГМ без теплообменников нагрузки эта величина достигает более 60 К в пусковом режиме. В работе приведены методы расчета ΔQ_{a2} для обоих случаев.

В результате изменение температур ступеней за цикл удается выразить в виде:

$$\Delta T_{x1} = (Q_{x1} - Q_{o1}) \Delta \tau / (B_1 + c_{o1} M_{o1}),$$

$$\Delta T_{x2} = [(Q_{x2} - Q_{o2}) \Delta \tau - (A_2 - B_2) \Delta T_{x1}] / (B_2 + c_{o2} M_{o2}),$$

где c_o , M_o - теплоемкость и масса конструкций ступени и объекта охлаждения, имеющих температуру соответствующих ступеней. Температуры ступеней для расчета следующего квазистационарного цикла определяются как:

$$T_{x1i+1} = T_{x1i} - \Delta T_{x1i},$$

$$T_{x2i+1} = T_{x2i} - \Delta T_{x2i}.$$

В третьей главе проведено аналитическое исследование пускового режима двухступенчатой КГМ.

Математическая модель пускового режима двухступенчатой КГМ была реализована в виде программ для ЭВМ ЕС 1038 на языке ФОРТРАН-4 и требует сравнительно небольшого объема вычислительных работ. Машинное время, необходимое для расчета 10-ти минутного пускового периода, не превышает 1 минуты. Начальным условием при расчете соответствует равенство всех температур в КГМ температуре охлаждающей среды. Длительностью пускового периода считалось время достижения объектом охлаждения заданного уровня термостатирования.

На рис. I приведены расчетные и экспериментальные графики изменения температуры охлаждающего устройства (T_m) и температуры головок ступеней (T_{x1} и T_{x2}) во время пускового периода для первого макета КГМ. Параметры макета приведены ниже. Замедленная стабилизация температуры первой ступени - характерная особенность машин, проектирование которых велось без строгого ограничения дли-

тельности пускового периода. Первая ступень таких машин имеет относительно небольшую холодопроизводительность. Охлаждение конструкции первой ступени в значительной степени производится за счет "дорогого" холода, полученного во второй ступени на более низком температурном уровне.

В начале пускового периода давление в рабочей полости превышало в 2,5-3 раза максимальное давление в цикле на установившемся режиме работы. Это является характерной особенностью машины с манжетным уплотнением. В работе даны зависимости для определения наибольшего давления в полости. В начале пускового периода холодопроизводительность в 3,5-4 раза больше номинальной. В этом заключается одна из основных причин быстрого действия КГМ Стирлинга. Наиболее ярко она проявляется в машинах с манжетным уплотнением.

Увеличение массы объекта охлаждения от 0 до 160 г привело к росту длительности пускового периода на 25% при термостатировании объекта при 20 К. Такой незначительный прирост объясняется сравнительно большой массой конструкции КГМ. При установке экрана на первую ступень пусковой период сокращался на 15-20% благодаря компенсации части теплопритоков на более высоком температурном уровне. В машинах, рассчитанных на короткий пусковой период, относительная величина холодопроизводительности первой ступени больше, чем в исследованном макете. В этом случае выигрыш от установки экрана может превышать полученные в 1,5-2 раза.

На рис.2 приведены температурные кривые для случая термостатирования объекта с тепловыделением 12 Вт в температурном диапазоне 28-30 К. Кривая 1 соответствует охлаждению объекта без тепловыделений. Кривая 2 - одновременному включению объекта и КГМ. Кривая 3 получена при включении объекта при температуре 31 К. После включения происходит повышение температуры, затем она начинает снижаться. Точка В соответствует концу пускового периода. При включении нагрузки при 25 К (кривая 4) концу пускового периода соответствует точка С, когда температура объекта достигает нижней границы диапазона. Оптимальному варианту включения объекта соответствует кривая 5. При этом длительность пускового периода на 40% меньше, чем при одновременном включении объекта и КГМ.

При исследовании влияния отдельных параметров КГМ на длительность пускового периода принято термостатирование устройств при 20 К. В данном случае в качестве исходного образца можно ис-

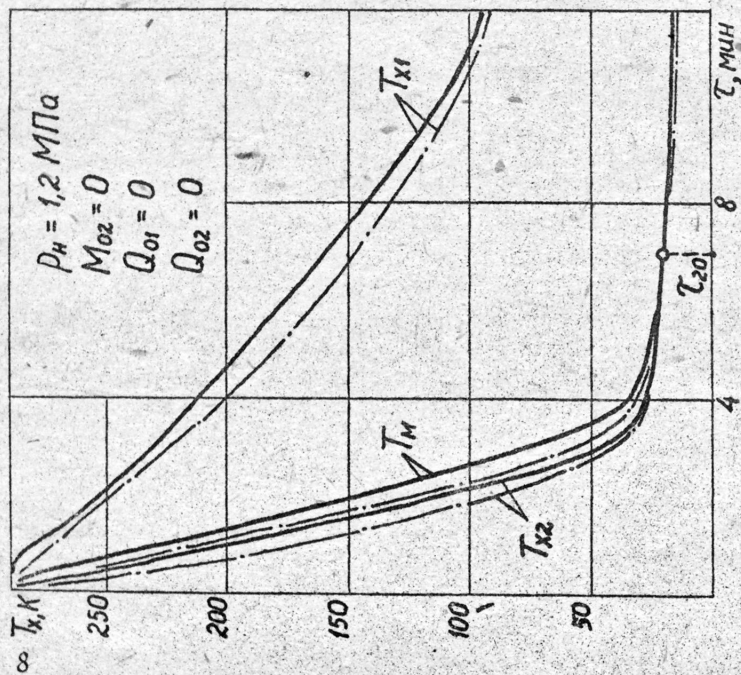


Рис. 1 Пусковой период первого макета КГМ.
 — эксперимент, — — — расчет.

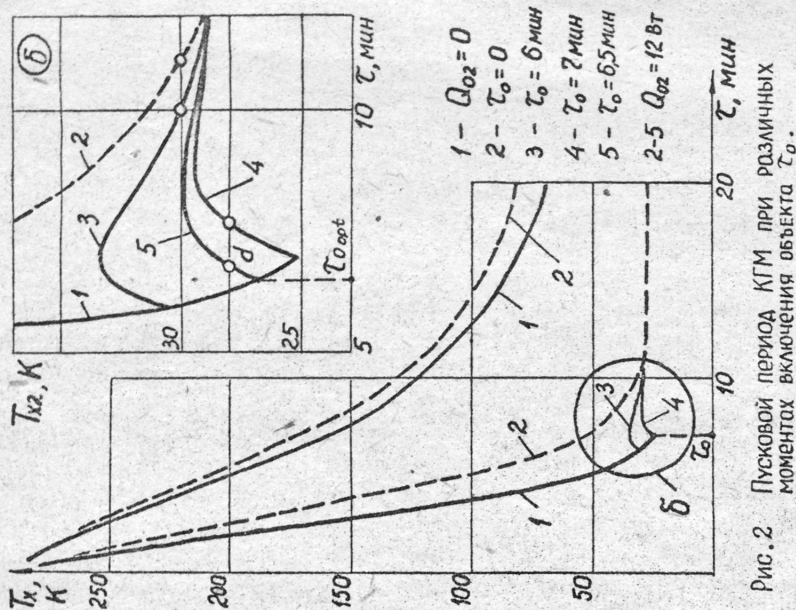


Рис. 2 Пусковой период КГМ при различных моментах включения объекта τ_0 .

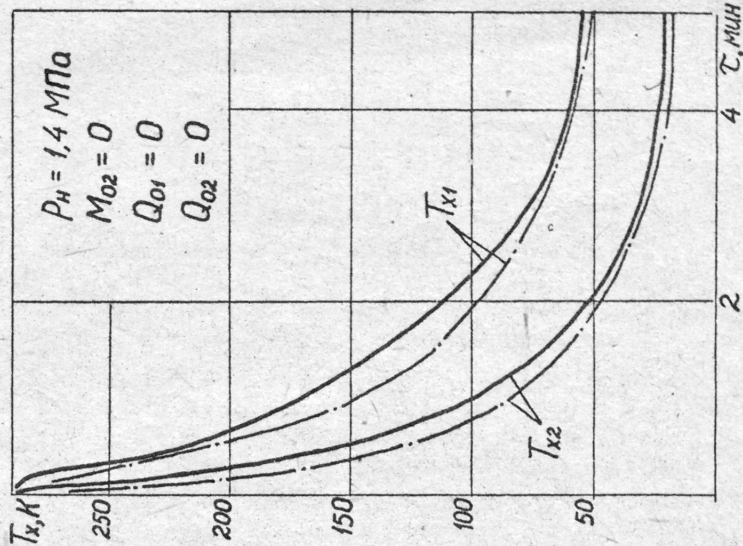


Рис. 4 Пусковой период второго макета КГМ.
 — эксперимент, — расчет.

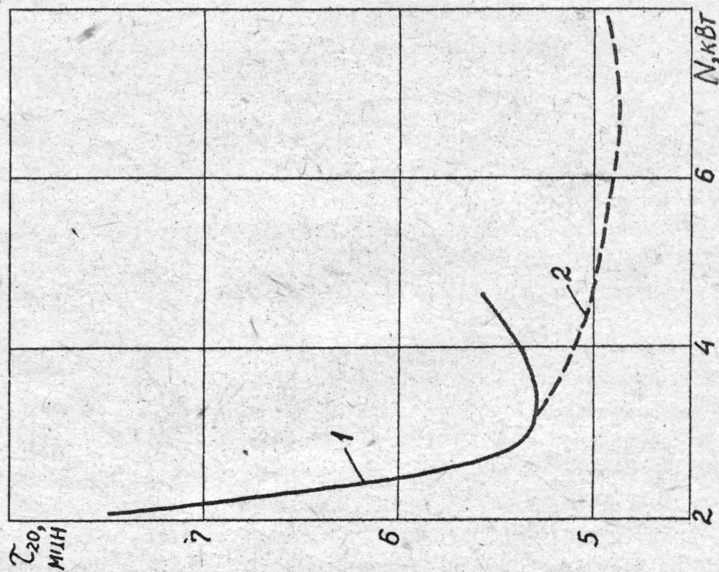


Рис. 3 Влияние мощности привода КГМ на τ_{20} .
 1-резонаторы изменяются,
 2-резонаторы постоянны.

пользовать исследованный в настоящей работе первый макет КГМ. Но он создавался на другие условия работы. Новые машины, спроектированные на заданные условия, будут иметь меньшую длительность пускового периода. В работе рассмотрены четыре серии машин, у которых за счет изменения диаметров цилиндров и размеров регенераторов получены различные пусковые характеристики. Ход поршня, ход вытеснителей, число циклов, давление заправки и другие параметры оставались постоянными и равными соответствующим параметрам первого макета. Такой подход обеспечил снижение трудоемкости расчетов при выявлении основных особенностей пусковых режимов и обеспечил наглядность иллюстрации роли отдельных факторов.

В первой и второй серии машин размеры изменялись так, чтобы мощность привода оставалась постоянной и равной мощности привода первого макета. В первой серии увеличение отношения объемов детандерных полостей первой и второй ступени с 0,73 до 1,5 привело к сокращению длительности пускового на 19%. Однако при этом уменьшилась холодопроизводительность и КПД при работе на установившемся режиме на 3,5%. Во второй серии машин в отличие от первой изменялись диаметры регенераторов синхронно с изменением диаметров полостей. В этом случае пусковой период сократился лишь на 12% при уменьшении КПД на 8% из-за увеличения массы регенераторов. В третьей серии машин изменилась мощность привода и холодопроизводительность первой ступени. На рис. 3 приведен график изменения длительности пускового периода в зависимости от мощности привода машин третьей серии (кривая 1). Максимальное сокращение длительности пускового периода составило 35% при увеличении мощности на 55% и сокращении КПД на 50%. В четвертой серии синхронно увеличивались размеры измеряемых полостей машин (кривая 2 на рис. 3). Максимальное сокращение длительности пускового периода (40%) получено при уменьшении КПД в 1,6 раза. Применительно к размерам первого макета проведена оптимизация размеров регенераторов. За счет оптимизации удалось сократить длительность пускового периода на 33% при увеличении мощности привода на 16% и снижением КПД машины на установившемся режиме на 40%.

Анализ результатов исследования показал, что оптимальные размерные соотношения, полученные из условия обеспечения наиболее короткого пускового периода, отличны от найденных из условий обеспечения максимального КПД при работе на установившемся режиме. Существует принципиальная возможность сокращения длительности пускового периода многоступенчатых машин в 1,5-2 раза в сравнении

с полученной на эксплуатирующихся в настоящее время КГМ. КПД таких быстродействующих машин будет в 2-2,5 раза ниже, чем у существующих.

В работе предложен и исследован способ сокращения длительности пускового периода за счет охлаждения первой ступени криогенной жидкостью. Так, применительно к размерам первого макета подача жидкого азота в течение 15 секунд при расходе 0,01 кг/с привела к сокращению пускового периода в 2,5 раза. Следует подчеркнуть, что такой способ сокращения длительности пускового периода не приводит к уменьшению КПД при работе на установившемся режиме и практически не вызывает увеличения размеров машины.

В четвертой главе дано описание стенда для проведения экспериментальных исследований пускового режима двухступенчатых КГМ, состоящего из комплекса контрольно-измерительной аппаратуры и макета КГМ, приводятся все технические характеристики стенда, изложена методика проведения экспериментальных исследований и проведена оценка погрешности измерения.

В качестве опытных макетов использовались две однотипные двухступенчатые КГМ с водяным охлаждением. Для первого макета объемы: компрессорной полости - $110 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ (для второго макета - $7,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$); полости первой ступени - $4,24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ($1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$) полости второй ступени - $5,80 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ($0,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$). В качестве насадки регенератора первой ступени использовалась сетка из фосфористой бронзы № 0063, второй ступени - оловянная сетка № 0071. Частота вращения коленчатого вала составляла 1500 об/мин.

В ходе экспериментальных исследований измерялись температуры ступеней, объекта охлаждения второй ступени и экрана при помощи датчиков сопротивления и двух цифровых ампервольтметров Ф-30. Быстроменяющиеся значения температуры и давления газа в компрессорной полости измерялись малоинерционными платиновым термометром сопротивления и мембранным датчиком давления ТДМ с тензосилителем 8АНЧ-7М. Сигнал от датчиков регистрировался на шлейфовом осциллографе Н-105. Давление заправки измерялось образцовым манометром. Проводились измерения расхода и температур охлаждающей воды, клеммовой мощности встроенного электродвигателя, тепловой нагрузки на ступени и степень разрежения в высоковакуумной изоляции. Тепловая нагрузка на ступени имитировалась электронагревателями, масса объектов охлаждения - съемными медными дисками.

Суммарная величина абсолютной погрешности определения температур на первом макете КГМ для первой ступени составляет $\pm 1,49 \text{ К}$

(относительная величина $\pm 2,31\%$), экрана $\pm 0,357\text{K}$ ($\pm 0,51\%$), второй ступени $\pm 1,7\text{ K}$ ($\pm 11,31\%$). Для второго макета погрешность определения температуры первой ступени составляет $\pm 2,1\text{ K}$ ($\pm 3,49\%$), второй ступени $\pm 0,528\text{ K}$ ($\pm 2,64\%$).

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований в сравнении с расчетными с целью доказательства адекватности предлагаемой математической модели действительности.

Экспериментальные исследования для первого макета КГМ проводились при давлениях заправки P_n от 0,8 до 1,4 МПа; массах объекта охлаждения второй ступени - до 160 г; тепловой нагрузки на первую ступень - до 10 Вт; на вторую ступень - до 12 Вт. Испытывались конструкции КГМ с экраном и без экрана на первой ступени. Для второго макета КГМ проводились экспериментальные исследования при тепловой нагрузке на вторую ступень до 3 Вт. На рис. 1 и 4 приведены экспериментальные и расчетные пусковые характеристики для первого и второго макетов КГМ.

Во всем диапазоне изменения нагрузки, массы объекта охлаждения, давления заправки получено хорошее качественное совпадение расчетных и экспериментальных величин. Максимальная величина расхождения по температуре составила 21% и соответствует началу пускового периода, когда наиболее проявляется погрешность от допущения о линейной зависимости температуры по длине конструкции и от пренебрежения температурным напором между газом и головкой цилиндра машины. Максимальное расхождение в расчете длительности пускового периода не превышало 17% от истинных значений. Сопоставление результатов расчета по предлагаемой математической модели с данными экспериментальных исследований подтверждает достаточную обоснованность модели.

В ходе исследования влияния P_n было выявлено, что оптимальные значения P_n , соответствующие максимальному КПД КГМ и тем более минимальной длительности пускового периода, много выше используемых в настоящее время. Величину P_n ограничивают из условия прочности конструкции, долговечности уплотнений и узлов трения. Поэтому любые мероприятия, направленные на улучшение прочностных характеристик машин, на повышение износостойкости узлов трения, будут сопровождаться сокращением длительности пускового периода. Для первого макета КГМ увеличение P_n от 0,8 до 1,4 МПа приводит к монотонному сокращению длительности пускового периода на 30% .

В отечественных и зарубежных машинах Стирлинга малых разме-

ров исключены теплообменники нагрузки. Такое упрощение привело к дополнительному увеличению температурного напора между газом и головкой цилиндра в начале пускового периода на 10-15 К, при работе с тепловой нагрузкой на установившемся режиме в зависимости от нагрузки на 3-7 К. Соответственно сократился КПД машины на 15-25%. Установка теплообменника нагрузки второй ступени позволит понизить уровень термостатирования на 15% или сократить длительность пускового периода на 9%. Поэтому, на наш взгляд, такое упрощение конструкции не всегда оправдано.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель пускового режима многоступенчатых КГМ любого типа.

2. Адекватность разработанной математической модели пускового режима многоступенчатых КГМ действительности проверена при сопоставлении расчетных и экспериментальных исследований на двух макетах КГМ, с экраном на первой ступени и без экрана, при изменении давления заправки от 0,8 до 1,4 МПа, тепловых нагрузок на первую ступень до 10 Вт, на вторую - до 12 Вт, массы объекта охлаждения до 160 г. Во всех случаях расхождения расчетных и экспериментальных значений длительности пускового периода не превышало 17%, температур ступеней - 21% от истинных значений. Время расчета 10-ти минутного пускового периода на ЭВМ ЕС 1033 не превышало 1 минуту.

3. Оптимальные с точки зрения наименьшей длительности пускового периода геометрические размеры машин отличаются от таковых, найденных из условия наивысшего КПД в установившемся режиме. В рассмотренных примерах получено сокращение пускового периода:

- на 19% при увеличении отношения объемов полостей первой и второй ступени с 0,73 до 1,5 без увеличения мощности привода и снижении КПД машины на 3,5%;
- на 40% при увеличении мощности привода в 3,5 раза и снижении КПД в 1,6 раза;
- на 33% при изменении размеров регенераторов и снижении КПД на 40%.

Таким образом КПД машин не является исчерпывающей характеристикой совершенства КГМ, при проектировании которых ограничивают длительность пускового периода.

4. Изменение внешних параметров КГМ позволило сократить длительность пускового периода для первого макета:

- на 30% при увеличении давления заправки от 0,8 до 1,4 МПа;
- на 15-25% при установке экрана на первую ступень;
- на 40% при подборе оптимального момента времени включения объекта охлаждения, имеющего тепловыделения.

В быстродействующих КГМ следует ожидать более значительного сокращения пускового периода при установке экрана на первую ступень.

5. Предложен и исследован способ сокращения пускового периода при помощи предварительного охлаждения первой ступени криогенной жидкостью, что в рассмотренном примере при подаче жидкого азота в течение первых 15 с с расходом 0,01 кг/с позволяет сократить пусковой период в 2,5 раза без увеличения мощности привода и ухудшения КПД машины в установившемся режиме.

6. В отечественных и зарубежных микромашинах Стирлинга включены теплообменники нагрузки, что приводит к уменьшению КПД машины на 15-25%. Установка теплообменника нагрузки позволит понизить уровень термостатирования на 15% или сократить длительность пускового периода на 9%.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих работах:

1. Суслов А.Д., Рыхов Е.Д. Методы анализа машин со встроенными теплообменными аппаратами. - Тезисы доклада / Всесоюзная научно-техническая конференция "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении". М., 1980, с.9.

2. Суслов А.Д., Рыхов Е.Д. Исследование пускового режима двухступенчатой криогенной газовой машины. - Химическое и нефтяное машиностроение, 1981, № 1, с.25-27.

3. Рыхов Е.Д. Пусковой период двухступенчатой криогенной газовой машины. - Химическое и нефтяное машиностроение, 1981, № 1, с.27-28.

от 12.11.1981г.

Л-86737 Заказ 1495 Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

Ротапринт МВТУ 107005, Москва, Б-5, 2-ая Бауманская, д.5

14

