

М498397

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ  
Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени государственный  
технический университет им. Н.Э. Баумана

На правах рукописи

УДК 621.415

МАХКАМОВ Хамидулла Хайруллаевич

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СВОБОДНОПОРШНЕВОГО  
ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

05.04.02 - Тепловые двигатели

АВТОРЕЗЮМЕ

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических  
наук

Москва - 1991

Работа выполнена на кафедре Э-2 Московского ордена Ленина,  
ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знаме-  
ни государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Научные руководители:  
доктор технических наук,  
профессор

М.Г. КРУГЛОВ

кандидат технических .  
наук, доцент

С.И. БИМОВ

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук,  
профессор

Н.Н. ПАТРАХАЛЫЦЕВ

кандидат технических  
наук, с.н.с.

В.В. ПОЛТАРАУС

Вс ущее предприятие

ЦНИДИ

Защита состоится " 13 " января 1988 г в 14<sup>00</sup> часов  
на заседании спе

машины и теор

им. Н.Э. Баум

бережная, д.1

С диссертат

им. Н.Э. Бауман

Авторефера

Ваш отзыв

печатью учрежд

2-ая Бауманска

Ученому секрет

ученый секрет

Совета К.053.1

Подписано к

Типография

М498397

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В ряде правительственных документов последних лет указывается на необходимость создания новых типов энергопреобразователей, которые могут использовать низкосортные топлива и возобновляемые источники энергии, а также обладают лучшими технико-экономическими и экологическими показателями. К перспективным силовым установкам, отвечающим вышеперечисленным требованиям, относится двигатель Стирлинга, характеризующийся универсальностью в отношении использования различных источников теплоты, высокой экономичностью, сравнительно низкой токсичностью продуктов сгорания, низким уровнем шума и вибрации. По постановлению ГКНТ СССР разработана и осуществляется программа проведения НИР и ОКР по созданию двигателей Стирлинга (ДС).

Одной из разновидностей двигателей Стирлинга является свободнопоршневой двигатель (СПДС). Функции маховика и приводного механизма по координации движения поршней в СПДС выполняют газовые или механические пружины.

До недавнего времени основное внимание разработчиков уделялось созданию двигателей Стирлинга с приводными механизмами. Для создания серийного образца двигателя предстоит решить ряд сложных конструктивных и технологических задач по герметизации внутреннего контура и повышению удельных массовых и габаритных показателей. Применительно к свободнопоршневым двигателям Стирлинга (СПДС) указанные проблемы в основном разрешены, и в ряде стран (США, Англия и др.) созданы серийные образцы свободнопоршневых двигателей в диапазоне мощности от нескольких Вт до 25 кВт и модули из них, обладающие высокими удельными технико-экономическими показателями, для использования на гражданских и военных объектах на земле, под водой и в космосе.

Проблемам разработки СПДС посвящено большое количество публикаций, но использование их в практической деятельности по созданию свободнопоршневых двигателей Стирлинга представляется затруднительным, так как они не содержат конкретной информации по методам расчета конструктивных параметров СПДС. Отсутствие экспериментальных и расчетных исследований рабочего процесса, а также методов расчета конструктивных параметров двигателя

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1498397

Махкамов Х.Х. Расчетно-эксп

у ложняют работы по созданию СПДС.

Целью работы является развитие теоретического и экспериментального исследований рабочего процесса свободнопоршневого двигателя Стирлинга.

Методы исследований. Работа основана на положениях классической термодинамики, теории рабочего процесса тепловых двигателей и математического моделирования технических систем. Использовался статистический метод обработки результатов эксперимента. Расчеты проведены на ЭВМ ЕС-1061. При проведении расчетов был использован ряд стандартных программ.

Н иная новизна работы заключается в следующем:

- разработан проект и создан экспериментальный образец свободнопоршневого двигателя Стирлинга вытеснительного типа, позволяющий в широком диапазоне изменять значения его конструктивных параметров;

- разработаны математические модели рабочего процесса СПДС первого и второго уровней;

- проведено экспериментальное и теоретическое исследование рабочего процесса двигателя;

- разработаны методики поверочного и конструкторского расчетов двигателя.

Практическая ценность. Результаты проведенных расчетно-экспериментальных исследований и разработанные математические модели и методики расчетов свободнопоршневого двигателя могут быть использованы для совершенствования действующей конструкции на стадии доводки и для выбора рациональных значений конструктивных параметров при проектировании двигателя.

Реализация результатов работы. Основные результаты исследований использованы в НПО "АСТРОФИЗИКА" (г.МОСКВА) и в НПО "ФИЗИКА-СОЛНЦЕ" АН УССР в работах по созданию свободнопоршневого двигателя Стирлинга. Результаты исследований и экспериментальная установка используются при проведении учебного процесса на кафедре "КДВС" МГТУ им. Н.Э. Баумана и на кафедре "ДВС" Ташкентского государственного технического университета.

Апробация работы. Основные положения и отдельные разделы диссертационной работы доложены на ежегодных научно-технических конференциях по итогам НИР кафедры

"Комбинированные двигатели внутреннего сгорания" МГТУ им. Н.Э. Баумана (1986, 1987 гг.), на Всесоюзной школе-семинаре "Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (г. Волгоград, 14-22 мая 1987 г) и на Всесоюзной научно-технической конференции "Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания" (г. Москва, 1987 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 статьи, тезисы докладов на Всесоюзной школе-семинаре 1987 г и Всесоюзной научно-технической конференции 1987 г, получено два авторских свидетельства. Отдельные разделы диссертации отражены в отчетах по выполненным в МГТУ им. Н.Э. Баумана при участии автора научно-исследовательским темам.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Объем диссертации - 121 страниц основного текста, 77 рисунок, 7 таблицы. Список использованных источников включает 147 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены работы, посвященные проблемам разработки, создания и исследования СИДС различных видов.

Анализ работ показывает, что данный вопрос привлекает пристальное внимание специалистов большого количества коммерческих фирм и научных организаций, специализирующихся на разработке преобразователей энергии, в различных странах мира. Подобный интерес объясняется тем, что, при использовании рассматриваемых машин, можно получить высокие значения технико-экономических показателей работы энергетических установок для выработки электрической энергии, перекачивания жидкостей и газов и выработки холода с использованием нетрадиционных источников тепла. По оценкам экспертов, СИДС, при использовании нетрадиционных источников энергии, обладают лучшей перспективой выхода на рынок по сравнению с ДС с приводными механизмами.

В настоящее время ведутся работы по созданию широкого класса свободнопоршневых машин Стирлинга. Наиболее широкое распространение, по мнению специалистов, получают автономные энергетические установки с СИДС вытеснительного типа с отдель-

ными газовыми или механическими пружинами, использующими в качестве нагрузочных устройств линейные генераторы, различные насосные устройства и холодильные машины.

Анализ существующих ММ рабочего процесса ДС показал, что они могут быть использованы для описания работы СПДС, но для этого необходимо учесть взаимозависимость и взаимовлияние рабочего процесса и динамики движения поршней двигателя. Указанная особенность накладывает отпечаток и на методики расчета СПДС.

Исходя из вышесказанного, были сформулированы следующие задачи исследований:

- создание ММ СПДС на основе математических моделей рабочего процесса ДС первого и второго уровней;
- создание методик конструкторского и поверочного расчетов СПДС вытеснительного типа;
- разработка проекта СПДС вытеснительного типа с отдельными газовыми пружинами или механическими пружинами поршней, его изготовление и создание экспериментального стенда со свободнопоршневым двигателем;
- проведение расчетных и экспериментальных исследований рабочего цикла СПДС, определение степени адекватности ММ СПДС и корректировка методик его расчета.

Во второй главе представлены ММ рабочего процесса СПДС первого уровня и методика его расчета.

На рис.1 приведена конструктивная схема экспериментального образца свободнопоршневого двигателя вытеснительного типа, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Двигатель состоит из трех основных частей - вытеснителя 1, поршня 2 и цилиндра 3. Нагрузочным устройством для двигателя служит поршневой пневматический насос 4, поршень 5 которого через шток 6 жестко связан с поршнем 2 двигателя. Горячая полость  $V_h$  сообщается с холодной полостью  $V_c$  через целевой нагреватель 7, цилиндрические регенераторы 8 и трубчатый холодильник 9.

В конструкции СПДС предусмотрена возможность использования обычных механических пружин сжатия вместо газовых пружин. В качестве штокового уплотнения использован узел, собранный из стальных тонкостенных сильфонов.

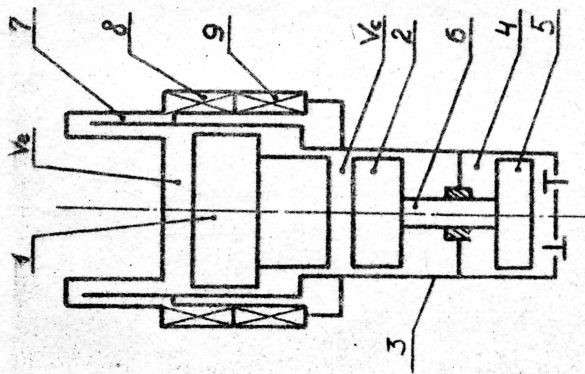


Рис.1. Конструктивная  
схема эксперимен-  
тального образца  
УНДС

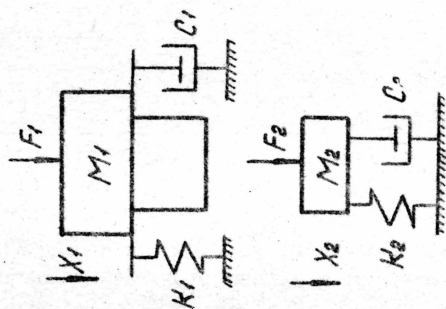


Рис.2. Расчетная схема  
УНДС по ММ  
первого уровня

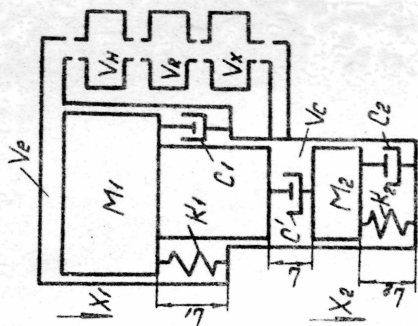


Рис.3. Расчетная схема  
УНДС по ММ  
второго уровня

На рис.2 приведена расчетная схема СПДС по ММ первого уровня. ММ модель представляет собой две системы алгебраических уравнений, полученных с использованием уравнений рабочего процесса по изотермической теории Шмидта-Киркли и уравнений вынужденных гармонических колебаний вытеснителя и поршня при действии вязкостного демпфирования.

Между вытеснителем и поршнем отсутствует жесткая механическая связь, поэтому расчетную схему СПДС можно представить как совокупность двух масс- вытеснителя ( $M_1$ ) и поршня ( $M_2$ ), совершающих колебания независимо друг от друга. Газовая связь между поршнями учитывается при определении амплитуд возмущающих сил ( $F_1$  и  $F_2$ ), действующих соответственно на вытеснитель и поршень.

Рабочий процесс СПДС в ее математической модели первого уровня рассматривается при допущениях, принимаемых в модели Шмидта-Киркли. При расчете рабочего процесса в формулах учитывается ступенчатая форма вытеснителя. Для построения ММ СПДС при анализе динамики, в дополнение к допущениям рабочего процесса, принимаются еще несколько допущений, в частности, допущения о постоянстве жесткости газовых пружин ( $K_1$  и  $K_2$ ) и о возможности замены сил реальных сопротивлений силами вязкостного демпфирования с коэффициентами  $C_1$  и  $C_2$ .

ММ первого уровня состоит из двух систем алгебраических уравнений, представляющих собой решение уравнений движений вытеснителя и поршня:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_j = \frac{F_j}{M_j \cdot \sqrt{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot n_j^2 \cdot \omega^2}} ; \\ \gamma_j = \arctg \left( \frac{2 \cdot \omega \cdot n_j}{\omega_j^2 - \omega^2} \right) \end{array} \right. \quad j=1,2$$

Здесь  $A$ -амплитуда колебаний поршней;  $\gamma$ -фазовый угол между кривыми перемещений поршней и возмущающей силы;  $\omega$ -круговая частота колебаний поршней;  $\omega_j$ -круговая частота собственных колебаний при отсутствии демпфирования;  $n$ -приведенный коэффициент демпфирования.

Значения  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $n_1$  и  $n_2$  выражаются через параметры цикла и конструктивные параметры двигателя, в результате чего можно получить квадратные уравнения для определения величин диаметров поршней  $d$  и  $D$ .

Цикловая работа ДС в классической изотермической модели рабочего процесса является функцией фазового угла  $\beta$  между кривыми перемещений поршней и отношения значений вытесняемых объемов холодной и горячей полостей  $Z$  при заданных значениях других параметров.

В свободнопоршневом двигателе, как это следует из ММ первого уровня, параметр  $Z$  зависит от угла  $\beta$  и, следовательно, цикловая работа является функцией только угла  $\beta$ .

Основная цель расчета по ММ первого уровня — определение конструктивных параметров двигателя с целью получения максимальной цикловой работы. Определение конструктивных параметров двигателя производится при заданных значениях нагрузки  $N_e$ , частоты колебаний  $\omega$  и амплитуды колебаний рабочего поршня из условия обеспечения максимального значения безразмерного параметра цикловой работы (по модели Шмидта-Киркли).

Полученные значения конструктивных параметров и показателей рабочего процесса являются ориентировочными и должны быть уточнены на втором этапе расчетов, на котором используется более сложная математическая модель рабочего процесса и динамики СПДС.

В третьей главе для описания рабочего процесса СПДС используется ММ второго уровня. Рабочие полости двигателя рассматриваются как открытые термодинамические системы с переменной массой. Процессы происходящие в рабочих полостях принимаются адиабатными, теплообменники — идеальными. Основными исходными уравнениями являются уравнения сохранения энергии, эписанные для рабочих полостей, уравнение массового баланса во внутреннем контуре и уравнение состояния газа. Потери в цикле, возникающие из-за действия кулоновых сил трения элементов уплотнения, гидравлического сопротивления теплообменных аппаратов, теплообмена в рабочих полостях и полезная нагрузка заменятся эквивалентными потерями в вязкостном демпфере. Притом, что сжатие газа в полостях газовых пружин происходит по адиабатному закону. Расчетная схема СПДС представлена на

р 3.3. ММ СПДС представляет собой следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} M_1 \cdot \frac{d^2 X_1}{dt^2} - P \cdot A_B + \zeta_1 \cdot \bar{P}_{\Gamma\Pi 1} \cdot A_B \cdot \left( \frac{1}{1 - \frac{X_1}{L_1}} \right)^k + C_1 \cdot \frac{dX_1}{dt} - C \cdot \frac{dX_2}{dt} + \zeta_2 \cdot K_1 \cdot X_1 &= 0; \\ M_2 \cdot \frac{d^2 X_2}{dt^2} - P \cdot A_{\Pi} + \zeta_3 \cdot \bar{P}_{\Gamma\Pi 2} \cdot A_{\Pi} \cdot \left( \frac{1}{1 - \frac{X_2}{L_2}} \right)^k + C_2 \cdot \frac{dX_2}{dt} - C \cdot \frac{dX_1}{dt} + \zeta_4 \cdot K_2 \cdot X_2 &= 0; \\ \frac{dP}{dt} + \frac{P \cdot \left( \frac{dV_e}{dt} \cdot \frac{1}{T_1} + \frac{dV_c}{dt} \cdot \frac{1}{T_2} \right)}{\frac{1}{k} \cdot \left( \frac{V_e}{T_1} + \frac{V_c}{T_2} \right) + \frac{V_H}{T_H} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_X}{T_X}} &= 0; \\ \frac{dT_e}{dt} - T_e \cdot \left( \left( 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{T_e}{T_1} \right) \cdot \frac{dP}{dt} \cdot \frac{1}{P} + \left( 1 - \frac{T_e}{T_1} \right) \cdot \frac{dV_e}{dt} \cdot \frac{1}{V_e} \right) &= 0; \\ \frac{dT_c}{dt} - T_c \cdot \left( \left( 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{T_c}{T_2} \right) \cdot \frac{dP}{dt} \cdot \frac{1}{P} + \left( 1 - \frac{T_c}{T_2} \right) \cdot \frac{dV_c}{dt} \cdot \frac{1}{V_c} \right) &= 0. \end{aligned} \right.$$

Здесь  $T_1 = T_H$  при  $\frac{dM_e}{dt} \geq 0$ ;  $T_1 = T_e$  при  $\frac{dM_e}{dt} < 0$ ;

$T_2 = T_X$  при  $\frac{dM_c}{dt} \geq 0$ ;  $T_2 = T_c$  при  $\frac{dM_c}{dt} < 0$ ;

$$A_B = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2); A_{\Pi} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}; A'_{\Pi} = \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - d_{\text{шт}}^2)$$

$$V_e = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (L_1 + X_{1m}); V_c = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (L - X_1 + X_2);$$

$$C_1 = C_{1\text{TP}} + C_{1\text{T}} + C_{1\Gamma} + C_{2\text{T}} + C_{2\Gamma};$$

$$C_2 = C_{2\text{TP}} + C_{N_e} + C_{2\text{T}} + C_{2\Gamma}; C' = C_{2\text{T}} + C_{2\Gamma}.$$

В приведенных выражениях  $X_m$  - расстояние между дном цилиндра и торцом вытеснителя со стороны горячей полости при среднем положении вытеснителя;  $L_1, L_2$  - высоты газовых пружин при среднем положении поршней;  $C_T, C_\Gamma$  - коэффициенты вязкостного сопротивления эквивалентных демпферов, заменяющих реальные сопротивления, действующие на поршни соответственно из-за гидравлического сопротивления трактов теплообменных аппаратов и тепловых потерь вследствие теплообмена между газом и стенками цилиндров в горячей и холодной полостях.

Коэффициенты  $\zeta_1 - \zeta_4$  равны либо нулю, либо единице в зависимости от типа используемых пружин (газовые или механические).

Для каждой из четырех фаз, на которые разбивается цикл, записывается своя система дифференциальных уравнений с учетом знаков расходов рабочего тела в полостях с переменным объемом.

При проведении поворочного расчета последовательно рассматриваются адиабатный цикл, цикл с учетом теплообмена между газом и стенками рабочих полостей, а также цикл, в котором производится учет влияния гидравлического сопротивления трактов теплообменных аппаратов (рис.4).

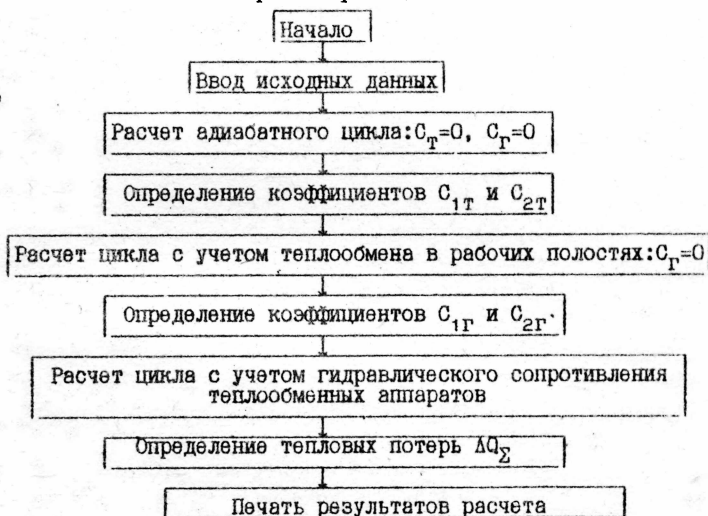


Рис.4. Блок-схема расчета СПДС по ММ второго уровня

Для решения системы дифференциальных уравнений ММ используется подпрограмма RKF45, основанная на методе Рунге-Кутты-Фельберга решения дифференциальных уравнений. Подпрограмма использовалась в режиме пошагового интегрирования для определения фазы текущего цикла двигателя.

Индикаторная цикловая работа двигателя определяется как разность площади индикаторных диаграмм горячей и холодной полостей:

$$I_{цил} = \int_0^{T_{\Gamma}} \left( P \cdot \frac{dV_e}{dt} \right) \cdot dt + \int_0^{T_{\Gamma}} \left( P \cdot \frac{dV_c}{dt} \right) \cdot dt,$$

где  $T_{\Gamma}$  - период колебаний поршней в цикле с учетом теплообмена в рабочих полостях и гидравлического сопротивления теплообменных аппаратов.

После вычислений значений тепловых потерь можно определить количество тепла, подводимого к нагревателю в течении цикла, и количество тепла, отводимого в холодильник за цикл.

$$Q_{подв} = \int_0^{T_{\Gamma}} \left( P \cdot \frac{dV_e}{dt} \right) \cdot dt + \Delta Q_{\Sigma}, \quad Q_{отв} = \int_0^{T_{\Gamma}} \left( P \cdot \frac{dV_c}{dt} \right) \cdot dt + \Delta Q_{\Sigma}.$$

Значения индикаторного и эффективного КПД определяются как

$$\eta_1 = \frac{I_{цил}}{Q_{подв}}, \quad \eta_e = \frac{N_e \cdot T_{\Gamma}}{Q_{подв}}.$$

Методика поверочного расчета СПДС по ММ второго уровня является одной из основных процедур при проведении конструкторского расчета двигателя.

В четвертой главе приведено подробное описание конструкции лабораторного образца свободнопоршневого двигателя Стирлинга, экспериментального стенда и комплекса контрольно-измерительной аппаратуры.

При изготовлении двигателя не удалось выдержать необходимые для работы газовой пружины допуска на размеры деталей цилиндро-поршневой группы и достичь нужной чистоты обработки их поверхностей. По этой причине в камеры газовых пружин были установлены механические пружины сжатия. На габаритные размеры

используемых пружин накладывались ограничения - это, в свою очередь, привело к сужению диапазона исследований по значениям максимального давления цикла и частоты колебаний поршней.

В задачи экспериментального исследования входил анализ влияния на работу двигателя величины параметров рабочего цикла и конструкции с целью определения степени адекватности ММ СПДС. Для этого были получены экспериментальные данные при следующих режимах работы:

$$1. \bar{T}_H = 833\text{К}, \bar{T}_X = 295\text{К}, v_s = 2.77, M_2/M_1 = 11.5,$$

$$P_{\text{зар}} = 0.5 \cdot 10^5, 1.0 \cdot 10^5, 1.5 \cdot 10^5, 2.0 \cdot 10^5, 2.5 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$2. \bar{T}_H = 738\text{К}, \bar{T}_X = 295\text{К}, v_s = 2.77, M_2/M_1 = 11.5,$$

$$P_{\text{зар}} = 0.5 \cdot 10^5, 1.0 \cdot 10^5, 1.5 \cdot 10^5, 2.0 \cdot 10^5, 2.5 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$3. \bar{T}_H = 833\text{К}, \bar{T}_X = 295\text{К}, P_{\text{зар}} = 1.5 \cdot 10^5 \text{ Па}, M_2/M_1 = 11.5,$$

$$v_s = 2.77, 3.3, 4.1, 4.3;$$

$$4. \bar{T}_H = 833\text{К}, \bar{T}_X = 295\text{К}, P_{\text{зар}} = 1.5 \cdot 10^5 \text{ Па}, v_s = 2.77,$$

$$M_2/M_1 = 9, 10, 11, 11.5, 12, 13, 13.5;$$

При исследованиях снимались осциллограммы изменений мгновенных значений ходов поршней, давления газа в холодной полости, перепада давления между рабочими полостями и температур рабочего тела в них, а также давления воздуха в полости сжатия компрессора. Кроме того, регистрировались средние температуры газа в рабочих полостях, тепловое состояние конструкции, расход и температура воды на входе и выходе рубашек охлаждения двигателя и датчиков. Погрешность определения измеряемых величин составляет 3÷23%. Исследования показали, что изменения режимных параметров (температура стенки нагревателя, масса газа во внутреннем контуре и т.д.) в процессе работы двигателя приводили к его остановке из-за возникновения соударений между поршнями и между вытеснителем и торцом цилиндра или из-за затуханий колебаний.

Пятая глава посвящена анализу результатов расчетного и экспериментального исследования рабочего процесса СПДС.

На рисунках 5 и 6 приведены примеры экспериментальных и расчетных кривых изменений положений поршней и давления рабо-

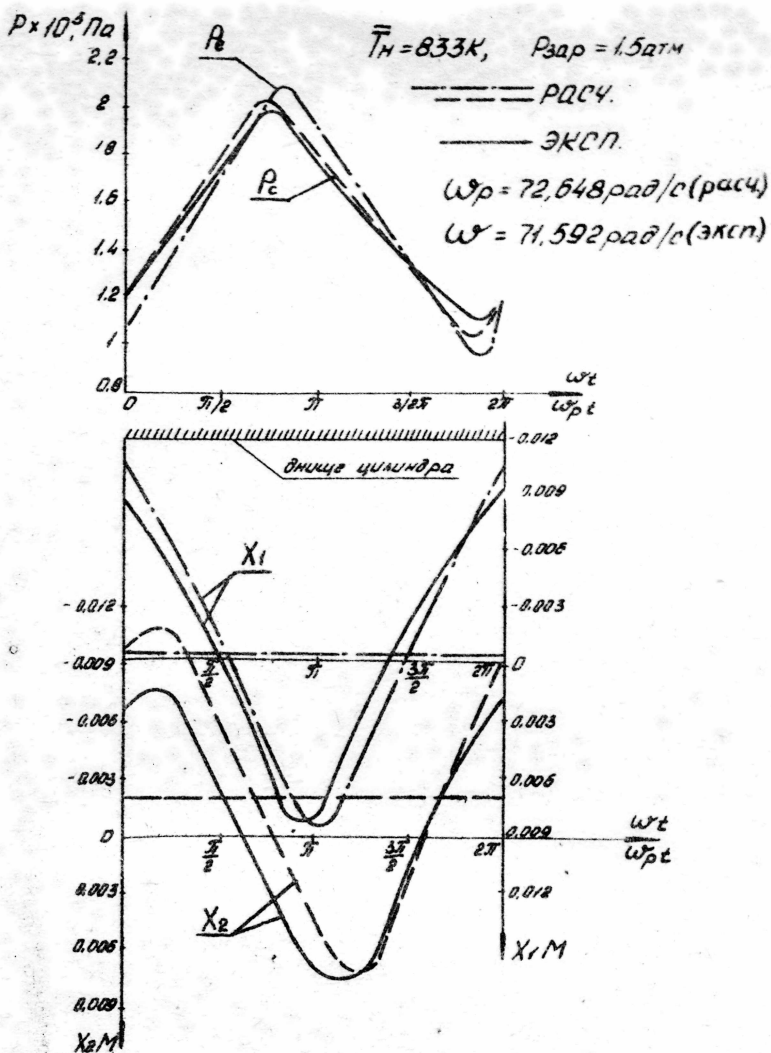
чего процесса за цикл, а также индикаторные диаграммы в рабочих полостях двигателя. Как видно из рисунков, из-за плохой координации движений поршней уменьшаются площадь индикаторной диаграммы горячей полости (максимальное давление цикла достигается в тот момент, когда вентиль находится близко к своему нижнему положению) и объем полости сжатия, что, в конечном итоге, приводит к уменьшению цикловой работы. При использовании пружин с большей жесткостью можно повысить значение цикловой работы и мощности за счет увеличения среднеинтегрального давления в цикле и частоты колебаний поршней. Как показали расчеты, при использовании газовой пружины характеры изменений объемов рабочих полостей и кривой давления практически не меняются, так как отношения амплитуд колебаний поршней к высоте соответствующей газовой пружины мало и давление в камере газовой пружины изменяется приблизительно по линейному закону и, следовательно, жесткости газовых пружин можно считать постоянными. При проведении расчетных исследований было установлено, что учет теплообмена в рабочих полостях между газом и стенками цилиндра практически не влияет на характер изменения их объемов и на частоту колебаний поршней.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по изменению показателей рабочего процесса в зависимости от его параметров и конструктивных параметров двигателя показало, что ММ второго порядка описывает процессы, происходящие во внутреннем контуре двигателя, с точностью 15+25% и может быть использована для проведения поверочного расчета.

Как показывают расчеты, мощность СПДС по ММ первого уровня на 40+55% больше мощности того же двигателя, определенной при поверочном расчете с использованием ММ второго уровня (по ходу расчета в системе дифференциальных уравнений ММ постепенно уменьшалось значение коэффициента  $C_{\eta}$ ). Ошибка в определении остальных параметров лежала в пределах 15+45%.

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что результаты расчетов по ММ первого уровня можно использовать в качестве исходных данных для проведения конструкторского расчета.

Методика проведения конструкторского расчета параметров СПДС основана на последовательном использовании ММ первого и второго уровней. На первом этапе расчета при помощи ММ первого



$Q_{ep} = 7.03 \text{ Дж}$

$Q_{ep} = 3.55 \text{ Дж}$

$Q_{ep} = 4.97 \text{ Дж}$

$Q_{ep} = 2.43 \text{ Дж}$

$L_{4p} = 3.48 \text{ Дж}$

$L_{4p} = 2.827 \text{ Дж}$

$N_{2p} = 40.24 \text{ БТ}$

$N_{2p} = 32.2 \text{ БТ}$

$P \times 10^5, \text{Па}$

$P \times 10^5, \text{Па}$

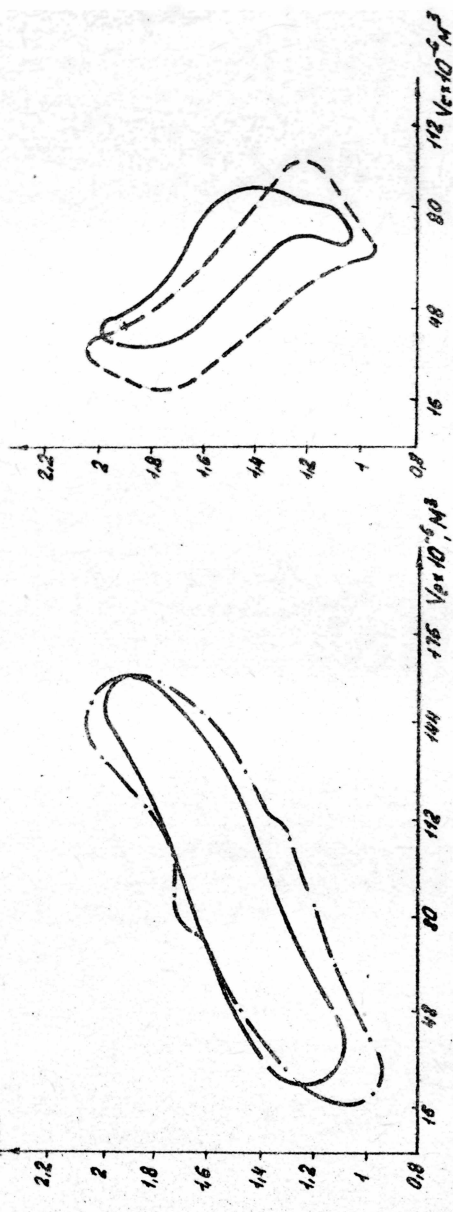


Рис. 6 Индикаторные диаграммы СПДС

уровня определяются ориентировочные значения конструктивных параметров двигателя. На втором этапе расчетов с использованием ММ второго уровня последовательно уточняются величины расстояния  $L$  между поршнями в их среднем положении, диаметров поршней  $d$  и  $D$ , а также объем газовой пружины рабочего поршня  $V_{гп2}$ . Время счета на ЭВМ ЕС-1061, с выводом на терминал ЭВМ промежуточных результатов, составляет 40+45 минут.

После определения конструктивных параметров СПДС в ходе создания эскизного проекта уточняются значения масс поршня и вытеснителя, диаметра вытеснителя  $D$ , а также мертвые объемы теплообменников, после чего расчет двигателя полностью повторяется.

Результаты расчетов, проведенных с использованием предлагаемой методики, с высокой степенью точности совпадают с аналогичными данными, опубликованными в зарубежных публикациях.

### ВЫВОДЫ

Проведенное расчетно-экспериментальное исследование рабочего процесса свободнопоршневого двигателя Стирлинга позволяет сделать следующие выводы.

1. Создана методология расчета СПДС  $\beta$ -модификации, основанная на использовании разработанных ММ первого и второго уровней и методик поверочного и конструкторского расчетов двигателя.

2. Создана конструкция лабораторного образца СПДС вытеснительного типа, позволившая исследовать влияние его конструктивных параметров и параметров рабочего процесса на работу двигателя. Установлено, что ММ второго уровня описывает рабочий процесс двигателя с точностью 15+25%.

3. Расчетно-экспериментальные исследования показали, что, при прочих равных условиях, цикловая работа исследованной конструкции СПДС  $\beta$ -модификации меньше аналогичного показателя ДС, так как в СПДС не достигаются оптимальные значения фазового угла между кривыми перемещения поршней и отношения вытесняемых объемов холодной и горячей полостей. Существует определенное значение соотношения масс поршней, при котором достигается максимальная мощность СПДС. Увеличение мертвого объема внутреннего контура приводит к большему падению мощности СПДС по сравнению с аналогичным изменением мощности ДС.

4. Установлено, что при проведении расчетов теплообмена между газом и стенками цилиндра в рабочих полостях двигателя можно пренебречь, так как учет теплообмена в уравнениях рабочего процесса не приводит к существенному уточнению значений показателей цикла.

5. Двигатель без системы активного регулирования в условиях изменения режимных параметров работает неустойчиво.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Ефимов С.И., Махкамов Х.Х. Определение конструктивных параметров свободнопоршневого двигателя Стирлинга на этапе предварительного проектирования/ МВТУ. -М., 1987. -16с.,ил. -Деп. в ЦНИИЭТяжмаш 27.02.87, №1876-тм87.

2. Махкамов Х.Х. Методика расчета свободнопоршневого двигателя Стирлинга вытеснительного типа//Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок: Тез. докл. VI Всесоюз. школы-семинара. -Волгоград, 1987. -С.120.

3. Махкамов Х.Х. Расчетно-экспериментальное исследование рабочего процесса свободнопоршневого двигателя Стирлинга//Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания и двигателей новых схем и на новых топливах: Тез. докл. Всесоюз. конф. -М., 1987. -С. 122.

4. Махкамов Х.Х. Изотермическая модель свободнопоршневого двигателя Стирлинга  $\gamma$ -модификации с гидравлической камерой под поршнем/ Ред. журн. "Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук." -Ташкент, 1989. -17с.,ил. -Деп. в ВИНТИ 12.06.89, №3875-В89.

5. Махкамов Х.Х. Математическая модель свободнопоршневого двигателя вытеснительного типа//Ред. журн. "Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук." -Ташкент, 1989. -16с.,ил. -Деп. в ВИНТИ 12.06.89, №3876-В89.

6. А.с. 1455027 СССР, МКИ<sup>3</sup> F 02 G 1/043 Сильная установка /С.Н.Караваев, Х.Х.Махкамов (СССР). -№1890026; Заявлено 03.02.87; Оpubл. 30.01.89//Открытия. Изобретения. -1989. -№1. -С.155.

7. А.с. 1537936 СССР, МКИ<sup>3</sup> F 16 J 1/24 Поршень/Х.Х.Махкамов, И.В.Дикопов (СССР). -№413197; Заявлено 25.04.88; Оpubл. 23.01.90; //Открытия. Изобретения. -1990. -№3. -С.176.