

Канд. техн. наук **Н.Г. КИРИЛЛОВ**

федеральный эксперт научно-технической сферы
ВКА им. А.Ф. Можайского, ИИЦ «Стирлинг-технологий»

A universal design procedure of reverse cycle Stirling machines (cryogenic, refrigerating machines of moderate refrigeration and heat pumps) has been proposed. The design is based on a two-level multiple parameters optimization. On the first level, using an adiabatic mathematical model the parameters of the exergetic efficiency of the ideal Stirling machine. On the second level, using a hydrodynamic model, the optimization is carried out for obtaining the maximum exergetic efficiency of a real machine. In so doing the results of the first level of optimization are used as external factors. According to the proposed procedure characteristics of a Stirling refrigerating machine with the capacity 50 kW are calculated.

При создании новых холодильных машин Стирлинга необходимы точное математическое моделирование и расчет на стадии проектирования. Иначе доводка опытных образцов превращается в многолетнее дорогостоящее экспериментирование. Методы расчета машин Стирлинга составляют know-how зарубежных фирм-разработчиков машин данного типа. Поэтому предлагаемый автором метод расчета машин Стирлинга может представить интерес для отечественных производителей.

Разработка метода расчета машины Стирлинга – это сложный, многоэтапный процесс [7] (рис. 1).

Сложность задачи состоит в трудности математического описания цикла Стирлинга в реальных машинах, где невозможно реализовать идеальный цикл Стирлинга.

На основе изучения современных подходов к проектированию был сформирован информационный методологический массив для разработки универсального метода расчета машин Стирлинга обратного цикла, представленный на рис. 2.

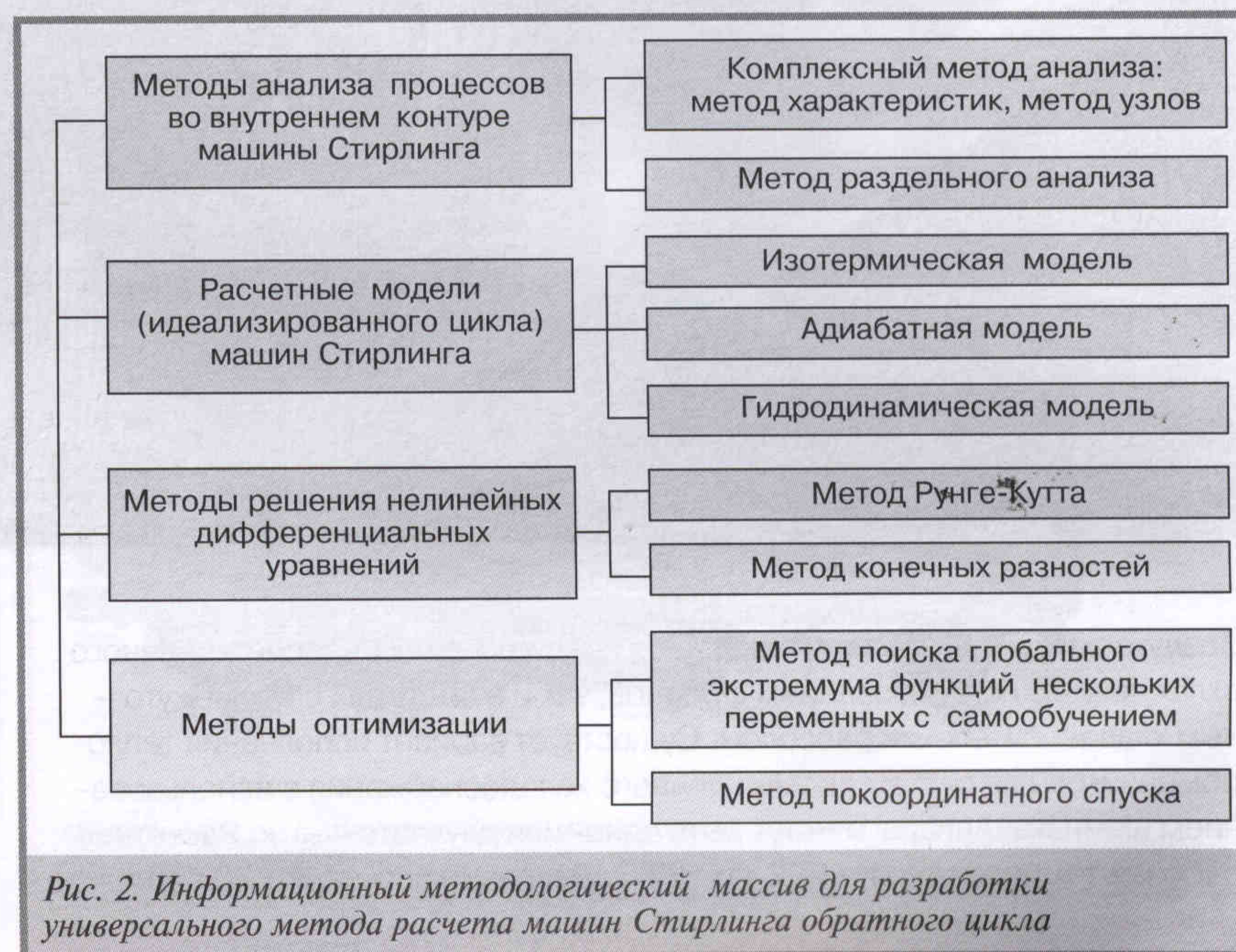
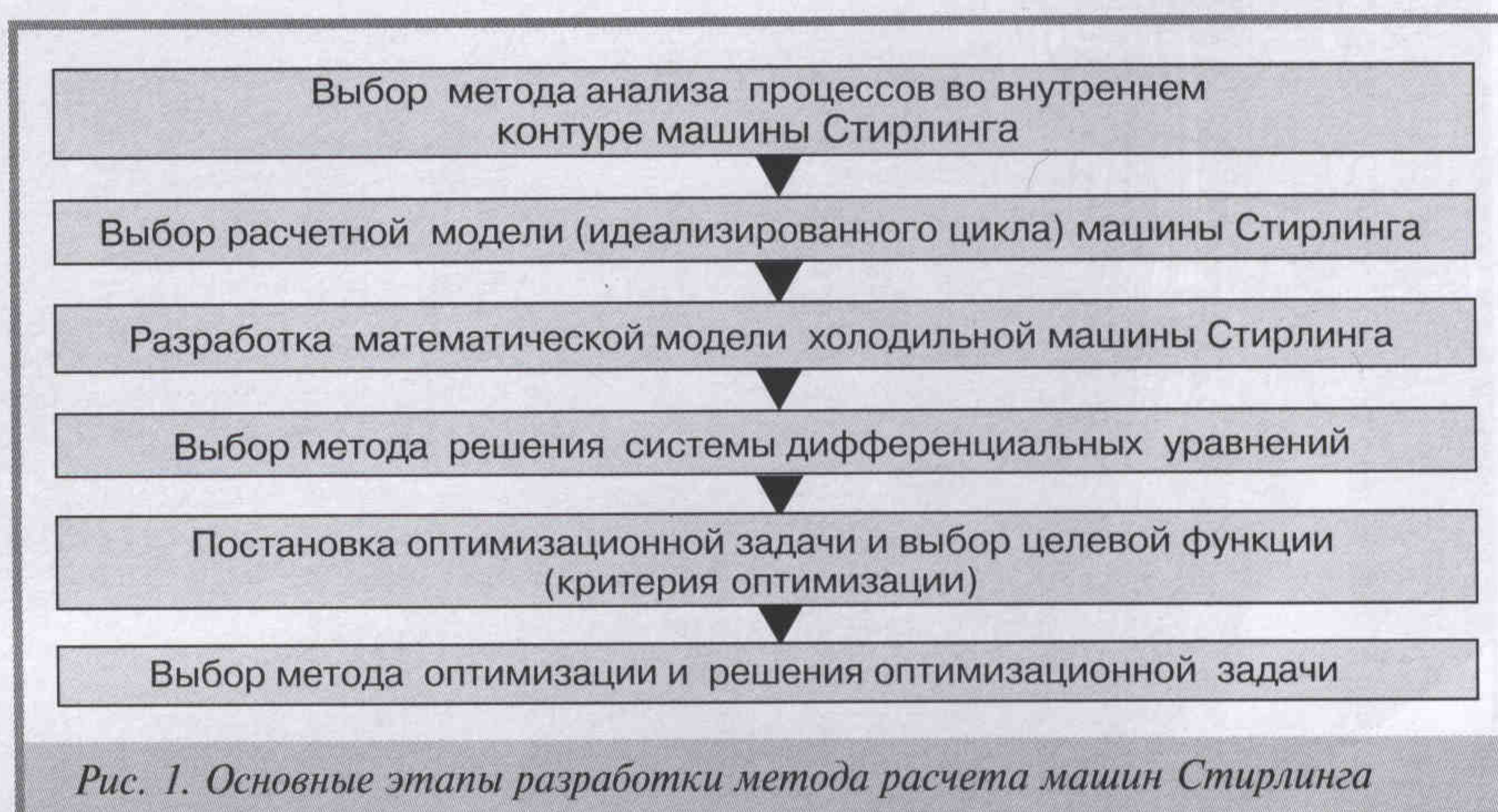
С использованием полученного методологического массива был

создан новый универсальный метод расчета машин Стирлинга обратного цикла (криогенных машин, холодильных машин для умеренного холода и тепловых насосов), структура которого представлена на рис. 3. Метод апробирован

при создании первой отечественной холодильной машины Стирлинга умеренного холода [1, 2].

Новый метод расчета от ранее известных отличаются:

- двухуровневая многопараметрическая оптимизация;
- комбинированное использование двух расчетных моделей на разных уровнях оптимизации;
- проведение оптимизации ха-



рактических характеристик всей машины в целом (вместо поузловой оптимизации);

- использование в качестве критерия оптимизации эксергетического КПД, что обеспечивает универсальность предложенного метода для всех машин, использующих обратный цикл Стирлинга.

В расчетных моделях нестационарный тепломассообмен во внутреннем контуре машин Стирлинга обратного цикла описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений. Для их решения и нахождения действительных характеристик машин Стирлинга был применен метод конечных разностей [4], при котором значения мгновенных параметров газа в рабочих объемах машины определяются из системы разностных уравнений, составляемых при делении цикла на множество мелких временных интервалов.

Алгоритм решения системы уравнений (гидродинамической модели) представлен на рис. 4.

При создании новой техники, как правило, стремятся получить максимальные значения показателей эффективности. Для машин Стирлинга обратного цикла таким показателем эффективности является эксергетический КПД — $\eta_{\text{эксер}}$ [4]. Нахождение максимума $\eta_{\text{эксер}}$ при заданном значении холодопроизводительности и температуры охлаждения сводится к определению оптимальных соотношений геометрических параметров главных элементов на основе многопараметрической оптимизации.

Четкой, строго определенной методики оптимизации машин Стирлинга обратного цикла не существует. Отраженные в ряде работ отечественных и зарубежных специалистов решения касаются в основном поузловой оптимизации, и при этом указывается на сложность оптимизации машины в целом.

Анализ этих работ позволил составить и реализовать методику двухуровневой многопараметрической оптимизации машин Стирлинга обратного цикла.

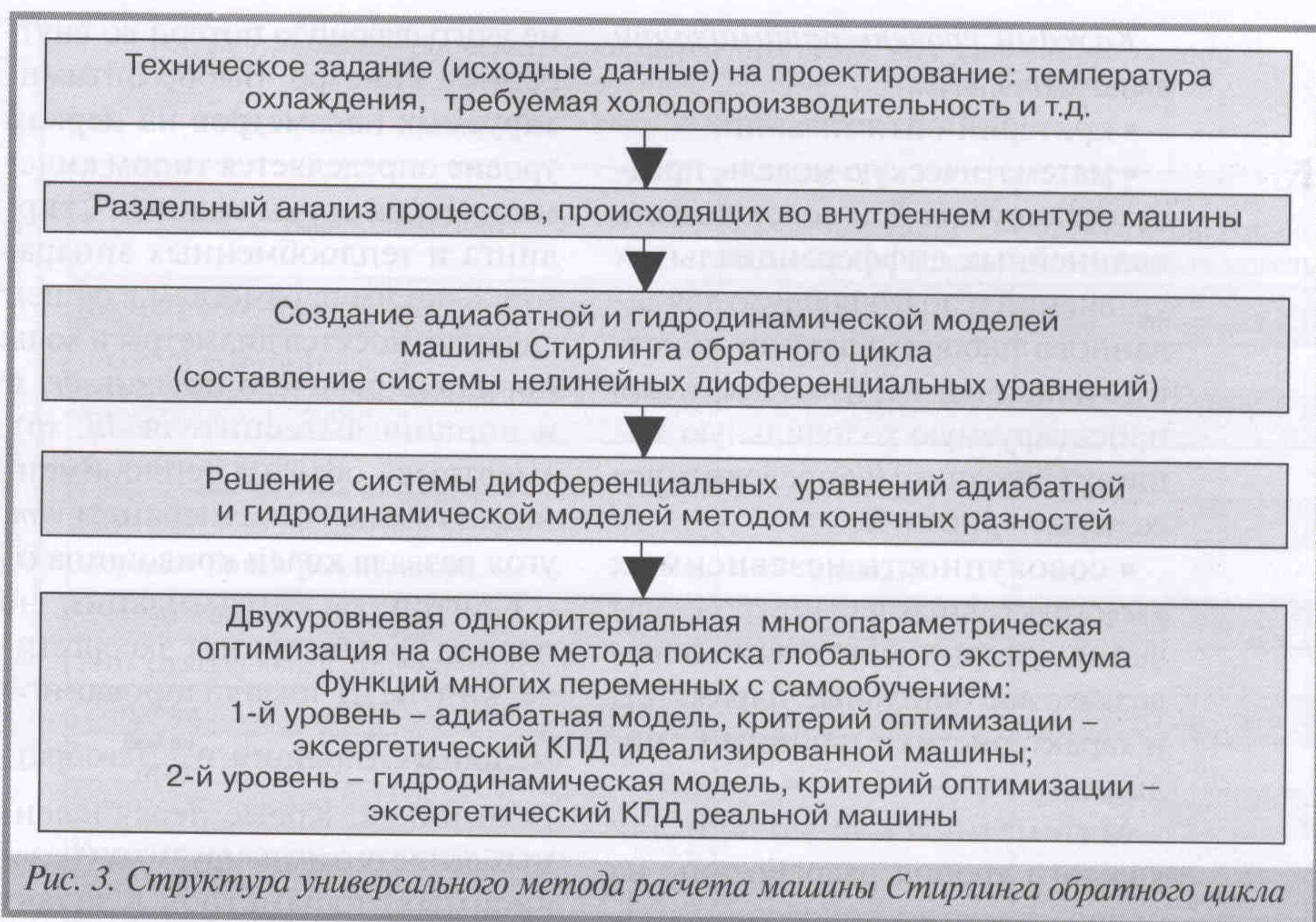


Рис. 3. Структура универсального метода расчета машины Стирлинга обратного цикла

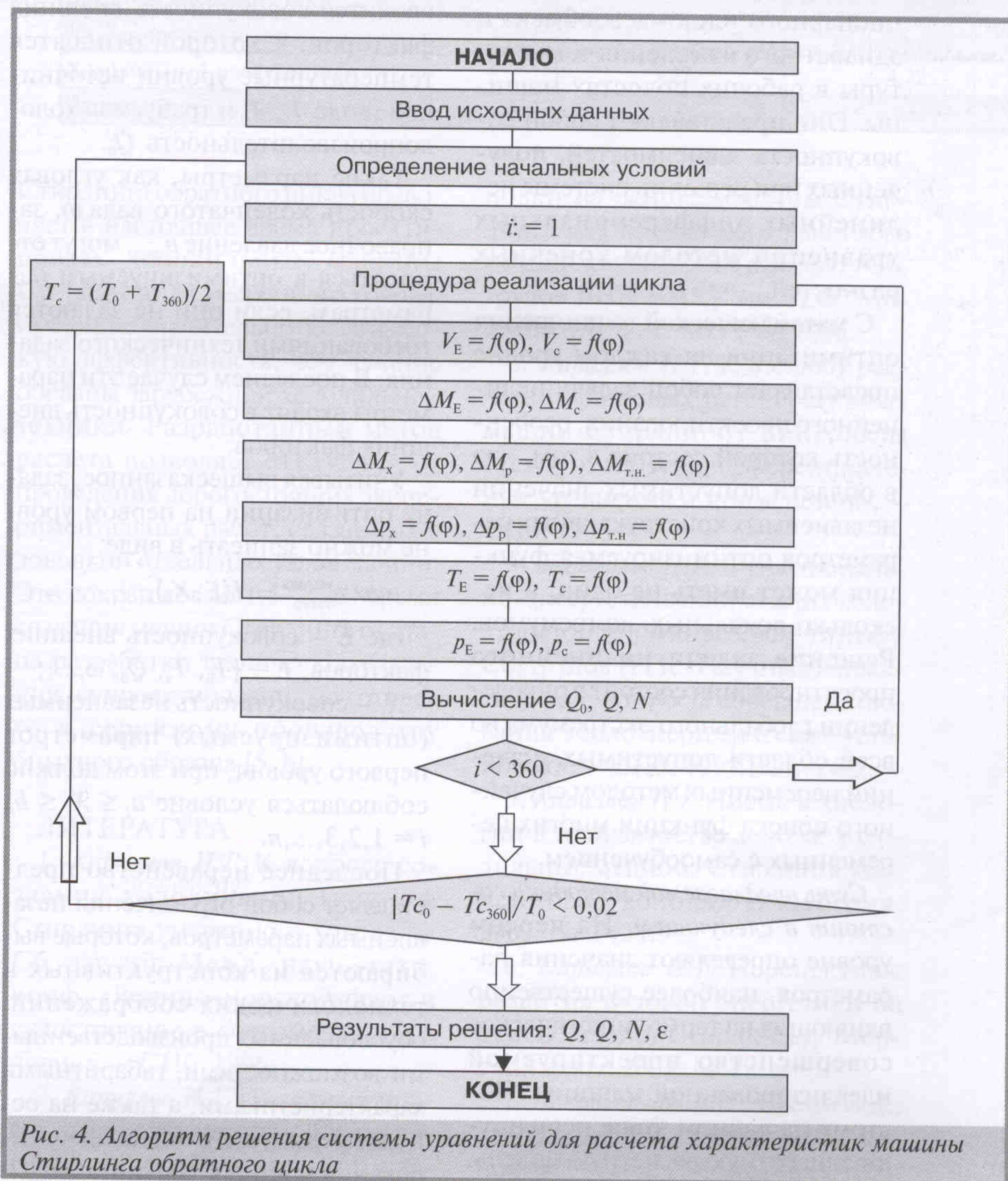


Рис. 4. Алгоритм решения системы уравнений для расчета характеристик машины Стирлинга обратного цикла

Каждый уровень оптимизации включает в себя:

- критерий оптимизации;
- математическую модель, представляющую собой совокупность нелинейных дифференциальных уравнений и позволяющую для заданного набора значений конструктивных параметров рассчитать проектируемую холодильную машину Стирлинга и определить все ее характеристики;
- совокупность независимых конструктивных параметров, значения которых однозначно определяют все остальные параметры и характеристики машины Стирлинга.

Математические модели для каждого уровня разработаны на основе теории процессов нестационарного тепломассообмена и адиабатного изменения температуры в рабочих полостях машины. Они представляют собой совокупность зависимостей, полученных при решении системы нелинейных дифференциальных уравнений методом конечных разностей.

С математической точки зрения оптимизация на каждом уровне представляет собой задачу нелинейного проектирования, особенность которой состоит в том, что в области допустимых значений независимых конструктивных параметров оптимизируемая функция может иметь не один, а несколько локальных экстремумов. Решение задачи нелинейного проектирования состоит в определении глобального экстремума во всей области допустимых значений переменных методом случайного поиска функции многих переменных с самообучением.

Суть предлагаемой методики состоит в следующем. На первом уровне определяют значения параметров, наиболее существенно влияющих на термодинамическое совершенство проектируемой идеализированной машины. Поэтому на данном этапе используют адиабатную расчетную модель,

не учитывающую потери во внутреннем контуре. Выбор оптимизируемых параметров на первом уровне определяется типом кинематической схемы машины Стирлинга и теплообменных аппаратов. К таким параметрам в общем случае относятся диаметры и ходы поршней (рабочего поршня dr , sr и поршня вытеснителя db , sb), «мертвые» объемы теплообменников v_{tm} , v_{xm} и регенератора v_{rm} , угол развала колен кривошипа α .

Критерием оптимизации на первом уровне принят эксергетический КПД идеализированной машины Стирлинга $\eta_{\text{эксер}}^{\text{ид. маш}}$ обратного цикла. Кроме перечисленных выше оптимизируемых (независимых) параметров в задачу вводится совокупность внешних факторов, к которой относятся температурные уровни источников тепла T_x , T_0 и требуемая холодопроизводительность Q_0 .

Такие параметры, как угловая скорость коленчатого вала ω , заправочное давление $p_{\text{запр}}$, могут относиться к оптимизируемым параметрам, если они не задаются требованиями технического задания. В последнем случае эти параметры входят в совокупность внешних факторов.

Учитывая вышесказанное, задачу оптимизации на первом уровне можно записать в виде:

$$\max \eta_{\text{эксп}}^{\text{ИД. маш}} = f(E, X_1),$$

где E — совокупность внешних факторов, $E = \{T_0, T_x, Q_0, \omega, \dots\}$;

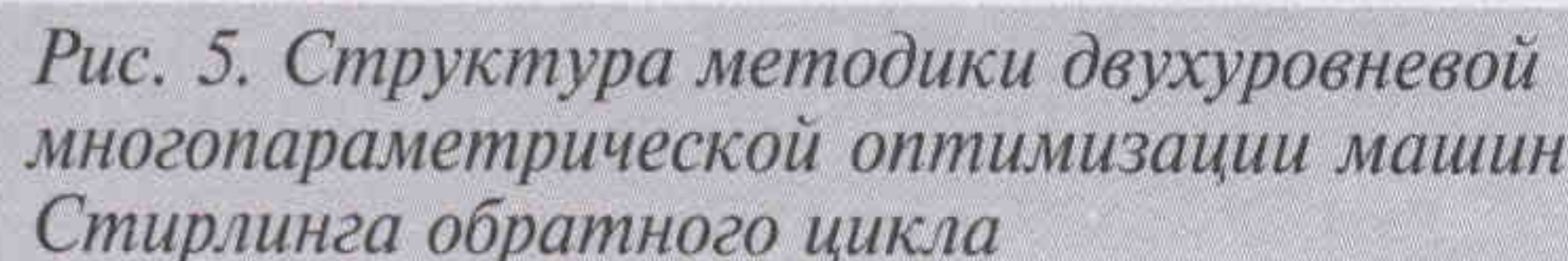
X_1 — совокупность независимых (оптимизируемых) параметров первого уровня, при этом должно соблюдаться условие $a_i \leq X_1 \leq b_i$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Последнее неравенство представляет собой ограничения независимых параметров, которые выбираются из конструктивных и технологических соображений, обусловленных производственными возможностями, габаритными характеристиками, а также на основе предыдущего опыта проектирования машин Стирлинга.

Получаемые при оптимизации первого уровня оптимизированные значения независимых параметров $X_1^{\text{опт}}$ входят в совокупность внешних факторов E для оптимизации второго уровня.

Цель оптимизации второго уровня — достижение минимального уровня суммарных потерь реального цикла (в сравнении с идеальным, принятым на первом уровне оптимизации). Величина отдельных составляющих потерь определяется их функциональной связью уже не с обобщенными характеристиками теплообменников («мертвыми» объемами), а с конкретными геометрическими параметрами холодильной машины Стирлинга (ХМС). Поэтому на втором уровне оптимизации в качестве независимых (оптимизируемых) параметров выступают внешний диаметр dr_w и длина регенератора lr , а также количество трубок (щелей) в теплообменниках n_x и n_t . Значения остальных геометрических параметров машины (длины теплообменников) находят из уравнений, связывающих оптимальные «мертвые» объемы с оптимизируемыми параметрами на втором уровне оптимизации. К совокупности внешних факторов относятся: внутренний диаметр трубок (параметры щели) теплообменников, тип насадки (материал), характер насадки (диаметр проволоки, пористость), угловая скорость коленчатого вала, заправочное давление, а также оптимальные параметры, полученные на первом уровне оптимизации: «мертвые» объем теплообменников и регенератора, диаметры и хода поршней, угол сдвига между кривошипами рабочего поршня и вытеснителя.

В качестве критерия оптимизации второго уровня принимается эксергетический КПД реальной машины Стирлинга обратного цикла, характеризующий термодинамическое совершенство проектируемой машины с учетом по-



Учитывая вышесказанное, задачу оптимизации на втором уровне можно записать в виде

где E – совокупность внешних факторов, $E = \{X_1^{\text{опт}}, T_0, T_x, Q_0, \omega, \dots\}$;

при этом $a_i \leq X_2 \leq b_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$.

В таблице даны основные характеристики ХМС умеренного холода (β -схема) для систем кондиционирования воздуха стационарных холодильных центров объектов МО РФ холодопроизводительностью 50 кВт, полученные на основе разработанного метода расчета с многопараметрической оптимизацией.

Стирлинга обратного цикла позволяет в настоящее время проектировать холодильные машины Стирлинга для умеренного холода, имеющие значительно более высокую эффективность, чем лучшие образцы зарубежной холодильной техники. Разработанный метод расчета позволяет отказаться от проведения дорогостоящих экспериментальных работ, связанных с доводкой отдельных узлов машин. Это сокращает до 1,5–2 лет время создания машин Стирлинга от этапа разработки технического задания на проектирование до готового к серийному производству опытного образца [5, 6].

1. Кириллов Н.Г. К вопросу создания холодильной машины Стирлинга умеренного холода. // Сб. трудов Межд. науч.-техн. конф. «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях. — СПб. 1996.

новки на основе машины Стирлинга для подвижного ракетного комплекса типа «Тополь»//Сб. трудов ВНК ВКУ им. А.Ф. Можайского. Т. 2. МО РФ. 2000.

4. Кириллов Н.Г. Функционально-энергетический анализ холодильной машины Стирлинга// Сб. трудов НТК «Научные и практические вопросы совершенствования теплоэнергетических установок». — СПб. 1995. Вып. №2.

5. Кириллов Н.Г. Новые технологии в производстве холода: холодильные машины Стирлинга умеренного холода//Индустрия. 2002. № 2 (28).

6. Кириллов Н.Г. Перспективы развития судовой энергетики на основе машин Стирлинга// Морской флот. 2002. № 2.

7. Новотельнов В.Н., Суслов А.Д., Полтараус В.Б. Криогенные машины. — СПб.: Политехника, 1991.

Характеристики	1-й уровень оптимизации (адиабатная модель)	2-й уровень оптимизации (гидро- динамическая модель)
Диаметр рабочего поршня, м	0,187	
Диаметр вытеснителя, м	0,167	
Ход рабочего поршня, м	0,09	
Ход вытеснителя, м	0,067	
Мертвый объем холодильника, м ³	0,000230	
Мертвый объем регенератора, м ³	0,000213	
Мертвый объем теплообменника нагрузки, м ³	0,000244	
Угол развала колен кривошипа, град	95	
Длина холодильника, м		0,21
Длина теплообменника нагрузки, м		0,196
Количество трубок в холодильнике, шт.		349
Количество трубок в теплообменнике нагрузки, шт.		296
Внешние характеристики:		
Холодопроизводительность, кВт	77,3	50,2
Холодильный коэффициент	5,27	4,22
Эксергетический КПД, %	91	73