

УДК 621.56:59

НОВЫЕ РОССИЙСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ:

практика создания отечественных машин Стирлинга умеренного холода

Д-р техн. наук **Н.Г. КИРИЛЛОВ**,
д-р техн. наук, проф. **В.П. БРЕУСОВ**
ООО "Инновационно-исследовательский
центр "Стирлинг-технологии"
ВКА им. А.Ф. Можайского

Results of the investigation of the first Russian prototype of Stirling refrigeration machine for moderate refrigeration are presented. A test facility is described, experimental characteristics of the machine are presented and factors influencing its operational efficiency are evaluated. Analytical relationships of refrigerating capacity, drive power and coefficient of performance from helium pressure in the internal loop of the machine are obtained.

Одним из наиболее перспективных направлений развития холодильной техники в XXI веке является создание холодильных машин Стирлинга умеренного холода (ХМС) [1–4].

Теоретически эффективность холодильных машин Стирлинга умеренного холода равна эффективности идеальной холодильной машины, работающей по циклу Карно. Опыт проектирования криогенных машин Стирлинга показывает, что существующие в ХМС потери при внешнем и внутреннем теплообмене и потере на трение могут быть устранены или существенно снижены при рациональном конструировании и подборе термодинамических параметров. Таким образом, достижение высокой эффективности ХМС определяется только оптимальностью конструктивных решений и точностью математического аппарата.

В качестве рабочих тел для машин Стирлинга обратного цикла могут применяться вещества, полностью отвечающие требова-

ниям Венской конвенции по охране озонового слоя и Монреальского протокола по озоноразрушающим веществам. Поэтому широкое внедрение холодильных машин Стирлинга умеренного холода уже в ближайшее время позволило бы решить проблему создания систем холодоснабжения, соответствующих современным требованиям “эффективность + экологическая чистота”. Сегодня диапазон холодопроизводительностей таких машин составляет 1...100 кВт, что обеспечивает широкие возможности их использования в различных областях промышленности и торговли [9].

Экспериментальные исследования первого российского опытно-промышленного образца ХМС были проведены совместно специалистами ООО “ИИЦ “Стирлинг-технологии”, ВКА им. А.Ф. Можайского и конструкторского бюро “АРСМАШ”, где был создан эксперименталь-

ный стенд для исследования холодильной машины Стирлинга умеренного холода.

На подготовительном этапе работ были конструктивно изменены теплообменник нагрузки (охладитель), регенератор и ряд других узлов машины, используемой в серийно выпускаемой ОАО “МЗ “Арсенал” воздухоразделительной установке “ЗИФ-1000”. Это позволило в кратчайшие сроки и с минимальными материальными затратами создать работоспособную холодильную машину Стирлинга умеренного холода для проведения экспериментальных исследований (рис. 1).

Экспериментальный стенд включает холодильную машину 10, работающую по циклу Стирлинга, контур промежуточного теплоносителя (холодный контур), объект охлаждения (термоконтейнер 3), систему охлаждения ХМС (горячий контур), систему контрольно-измерительной и преобразующей аппаратуры.

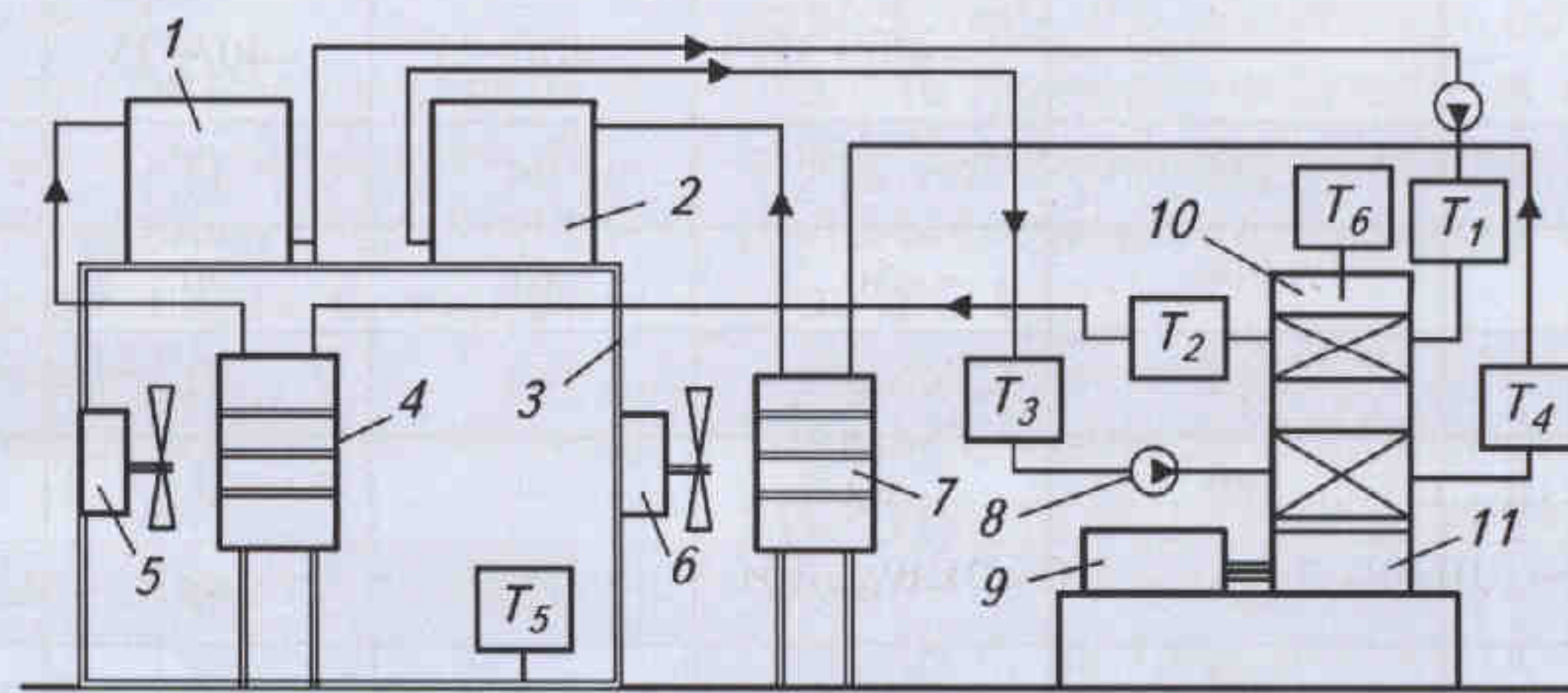


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования ХМС умеренного холода с местами установки датчиков:
1, 2 – дополнительные баки; 3 – термоконтейнер; 4, 7 – радиаторы холодного и горячего контуров; 5, 6 – вентиляторы; 8, 12 – насосы; 9 – электродвигатель ХМС; 10 – ХМС умеренного холода; 11 – привод ХМС;
Ti – места размещения датчиков

Холодильная машина Стирлинга выполнена по одноцилиндровой β -схеме с кривошипно-шатунным приводом и нагруженным картером. С учетом того что исследования холодильной машины проводили в температурном диапазоне $-40 \dots 0^\circ\text{C}$, холодный контур был заполнен тосолом. В горячем контуре использовали техническую воду. К охладителю масляного насоса подвели водопроводную воду (расход $0,9 \text{ м}^3/\text{ч}$). Для снятия тепловых нагрузок с горячего и холодного контуров использовали воздушное охлаждение через радиаторы 4 и 7 с возможностью раздельного включения вентиляторов 5 и 6 горячего и холодного контуров, что позволяло ускорить выход холодильной установки на стационарный режим. Машину Стирлинга заправляли гелием с предварительной деаэрацией. Система заправки позволяла регулировать давление в рабочих полостях в пределах $1,5 \dots 3,5 \text{ МПа}$.

В ходе эксперимента отработывали методики исследований ХМС производительностью 1...100 кВт в диапазоне температур $-40...0^{\circ}\text{C}$ и определяли:

- ✓ пусковые и действительные характеристики ХМС умеренного холода;
- ✓ время выхода машины на рабочие параметры;
- ✓ влияние заправочного давления гелия во внутреннем контуре на холодопроизводительность;
- ✓ скорость выхода машины на рабочие параметры;
- ✓ мощность электропривода и др.

Было проведено несколько серий испытаний. В качестве примера в таблице представлены результаты трех испытаний, что позволяет наглядно продемонстрировать характер работы и

динамику проведения экспериментальных исследований в целом.

По результатам замеров построены графики изменения по времени температуры гелия во внутреннем контуре ХМС (T_6) и температуры воздуха в контейнере (T_5), представленные на рис. 2 и 3.

Полученные в ходе экспериментальных исследований дан-

ные позволяют сделать следующие выводы.

➤ Первый стендовый образец холодильной машины Стирлинга умеренного холода имеет недостаточно высокий эксергетический КПД. Это объясняется тем, что создание машин на основе их криогенных аналогов (простой перевод машины с криогенного уровня температур на умеренный с доработкой от-

Результаты трех серий испытаний ХМС умеренного холода

Номер испыта- ния	q_T , м ³ /ч	q_B , м ³ /ч	p_{BK} , МПа	t_6 , °С	t_5 , °С	N , кВт	Q_0 , кВт	ε	Время выхода на рабочий режим
1	3,58	2,99	2,5	−38	1	4,4	2,3	0,52	4 ч 53 мин
2	3,64	3,16	2,6	−38	−4	4,9	2,6	0,53	4 ч
3	3,64	3,12	3,0	−37	−11	6,0	3,5	0,58	2 ч 50 мин

q_T – расход тосола; q_B – расход воды в системе охлаждения ХМС; p_{BK} – давление гелия во внутреннем контуре ХМС; t_6 – температура гелия во внутреннем контуре ХМС; t_5 – температура воздуха в контейнере; N – мощность ХМС; $\dot{Q}_0$ – холодопроизводительность ХМС; ε – холодильный коэффициент.

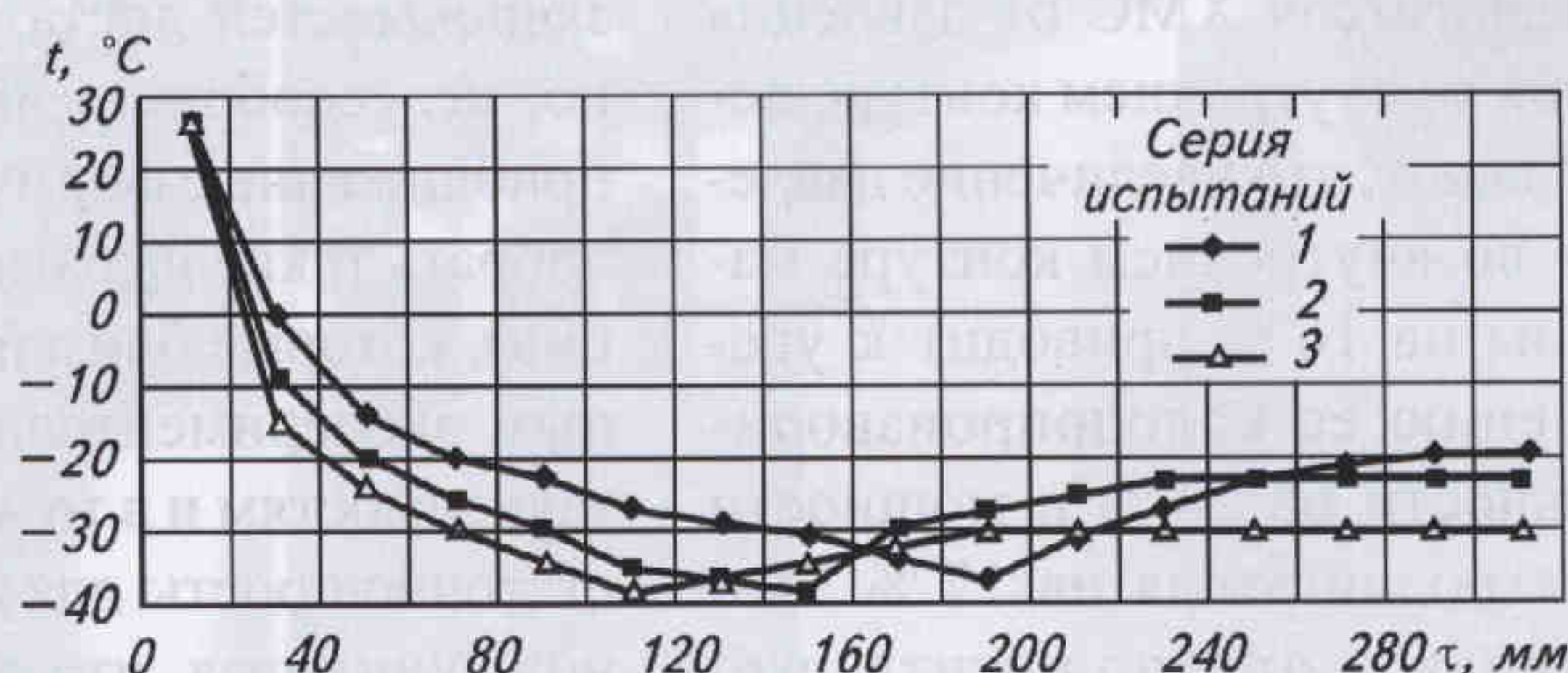


Рис. 2. Изменение температуры гелия во внутреннем контуре ХМС в ходе испытаний

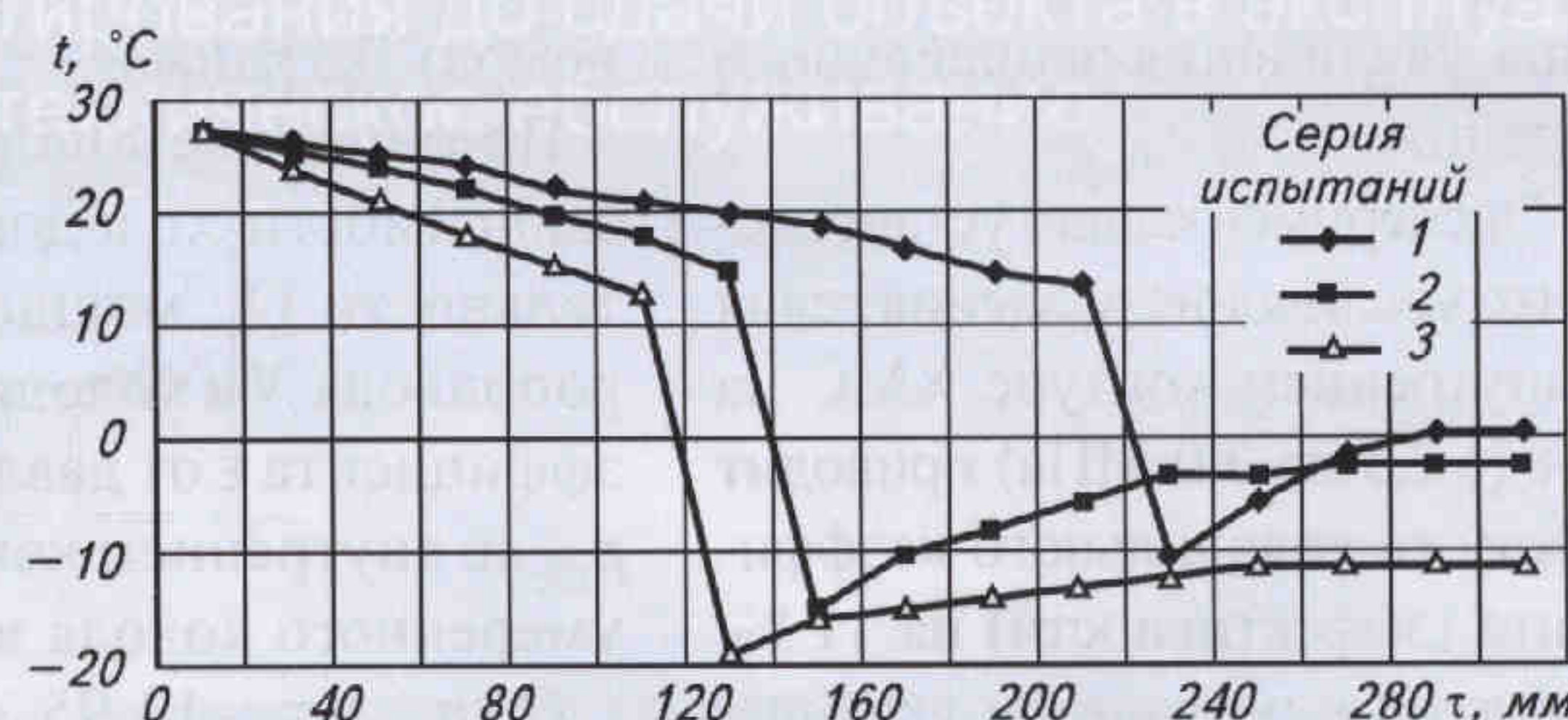


Рис. 3. Изменение температуры воздуха в термоконтейнере в ходе испытаний

дельных узлов) не позволяет достигнуть высоких показателей. Необходимо проведение многопараметрической оптимизации на этапе их проектирования.

В настоящее время специалистами ООО “ИИЦ “Стирлинг-технологии” разработан метод расчета машин Стирлинга обратного цикла с двухуровневой многопараметрической оптимизацией, который позволяет проектировать ХМС умеренного холода высокой эффективности и без проведения дорогостоящих экспериментальных работ, связанных с доводкой отдельных узлов. Это сокращает время создания машины от этапа разработки технического задания на проектирование до готового к серийному производству опытного образца до 1,5–2 лет [5–8].

➤ Экспериментально полученные зависимости холодопроизводительности и мощности электродвигателя ХМС от давления гелия во внутреннем контуре показывают, что увеличение давления во внутреннем контуре машины на 16 % приводит к увеличению ее холодопроизводительности на 28 % и мощности электродвигателя на 17 %. Это позволяет предположить, что мощность электродвигателя растет прямо пропорционально увеличению заправочного давления, а темп роста полезной холодопроизводительности выше темпа увеличения заправочного давления.

➤ Экспериментально установлено, что увеличение давления гелия во внутреннем контуре ХМС на 16 % (с 2,5 до 3,0 МПа) приводит к росту ее холодильного коэффициента (эффективности) на 11 %. Полученные результаты указывают на необходимость исследования возможности дальнейшего увеличения давления во внутрен-

нем контуре машины с целью повышения эффективности.

➤ Давление во внутреннем контуре машины существенно влияет на скорость выхода ее на стационарный рабочий режим. Так, увеличение давления во внутреннем контуре на 16 % ускоряет достижение нужного потребителю температурного режима на 43 %.

* * *

Отсутствие в литературе каких-либо аналитических зависимостей выходных характеристик ХМС умеренного холода (холодопроизводительности, мощности электродвигателя, холодильного коэффициента и т. д.) от параметров цикла и конструктивных характеристик обуславливает необходимость математической формализации полученных экспериментальных результатов. Поскольку строгое математическое описание экспериментальных зависимостей достаточно сложно, целесообразно использовать приближенные формулы, т. е. подобрать такие выражения (функции), которые близки к полученным экспериментальным путем зависимостям и в то же время достаточно просты для использования. Учитывая, что экспериментальные зависимости представлены в табличной форме, наиболее целесообразно приближенные формулы искать в виде интерполяционных многочленов (полиномов) Лагранжа.

Полученные аналитические зависимости холодопроизводительности Q_0 , мощности электропривода N и холодильного коэффициента ϵ от давления гелия $p_{\text{БК}}$ во внутреннем контуре ХМС умеренного холода имеют вид:

$$Q_0(p_{B.K}) \cong -14,95 + 10,65x - 1,5x^2;$$

$$N(p_{BK}) \cong 37,65 + 27,95x - 4,5x^2;$$

$$\varepsilon(p_{BK}) \cong 0,6 - 0,16x + 0,05x^2.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов Н.Г. Холодильные машины Стирлинга: особенности, области применения и тенденции развития отечественных технологий //Холодильная техника. 2003. № 9.

2. Кириллов Н.Г. От традиционных решений в холодильных машинах – к циклу Стирлинга// Вестник Международной академии холода. 2000. № 4.

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

4. Кириллов Н.Г. Машины Стир-
линга для высокоэффективных и
экологически чистых систем авто-
номного энергосбережения// Хи-
мическое и нефтегазовое машино-
строение. 2000. № 12.

5. Кириллов Н.Г. Пилотный проект высокоэффективной и экологически чистой холодильной установки на основе машины Стирлинга для подвижного боевого ракетного комплекса типа "Тополь-М" // Сб. тр. ВНК ВКУ им. А.Ф. Можайского. Т. № 2. МО РФ, 2000.

6. Кириллов Н.Г. Применение высокоэффективных и экологически чистых машин Стирлинга в судовой энергетике //Тр. 2-й Межд. конфер. по морским интеллектуальным технологиям "Моринтех-97". Т. № 5. СПб. 1997.

7. Кириллов Н.Г. К вопросу создания холодильной машины Стирлинга умеренного холода// Сб. тр. Международной науч.-техн. конф. "Военно-морской флот и судостроение в современных условиях". СПб. 1996.

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

9. *Kagawa N.* Regenerative Thermal Machines (Stirling Vuilleumier Cycle Machines) for Heating and Cooling/ International Institute of Refrigeration, 2000.