

УДК 621.56/59

**Г.К. Лавренченко**, доктор техн. наук

ООО «Институт низкотемпературных энерготехнологий», а/я 188, г. Одесса, Украина, 65026

e-mail: uasigma@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8239-7587>

## РЕФРИЖЕРАТОРЫ СТИРЛИНГА И ДРУГИЕ КГМ: РАЗВИТИЕ ИХ ТЕОРИИ НАУЧНОЙ ШКОЛОЙ ПРОФЕССОРА В.С. МАРТЫНОВСКОГО

*Двигатель Стирлинга был изобретен 200 лет назад. Его автор опередил своё время. Только в 50-ых годах прошлого века были созданы компанией «Филипс» удовлетворительно работающие его образцы. Одновременно с этим была разработана и экспериментально исследована криогенная газовая машина (КГМ), работающая по обратному циклу Стирлинга. Приведены основные показатели КГМ с прерывистым и гармоническим характером движения поршней. Показано, что в действительной машине Стирлинга с потерями от внутренней и внешней необратимости может достигаться оптимальная температура охлаждения, при которой степень термодинамического совершенства становится максимальной. Рассматриваются результаты систематизации различных КГМ, в том числе и Стирлинга, работающих с нестационарными потоками рабочего тела. Определено место семейства криогенных машин Стирлинга в выполненной систематике, использующей лишь общие термодинамические признаки.*

**Ключевые слова:** Криогенная газовая машина Стирлинга. Цикл Стирлинга. Гармонический привод. Холодопроизводительность. Потери от необратимости. Степень термодинамического совершенства. Семейства КГМ.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В конце 18-го — начале 19-го веков для зарождающейся промышленности стали разрабатываться разнообразные тепловые воздушные машины. Первой работающей машиной такого типа был тепловой воздушный двигатель открытого цикла, созданный *Г. Кайлеем* в 1807 г. [1, 2].



**Рис. 1.** Роберт Стирлинг (1790–1878 гг.)

В 1816 г. *Роберт Стирлинг*, священник из Шотландии, получил патент на тепловой двигатель с регенератором, который мог работать по замкнутому термодинамическому циклу. (рис. 1).

Разработкой этого двигателя *Стирлинг* опередил своё время. Действительно, не только сам изобретатель, но и его современники были не в состоянии понять и оценить ряд исключительно важных достоинств

двигателя.

Такая же судьба постигла и научные работы *Сади Карно*, включая и предложенный им обратимый предельно эффективный цикл, называемый его именем. И это несмотря на то, что в 1824 г. он опубликовал своё знаменитое сочинение «Размышления о движу-

щей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Как отмечается в [3], замечательный труд *Карно*, опередившего на многие десятилетия свою эпоху, явился основой новой науки — термодинамики, окончательно сформировавшейся лишь через 30 лет после выхода в свет указанной книги. Этому способствовали научные работы *Рудольфа Клаузиуса*, являющегося одним из основоположников термодинамики, много сделавшего не только для обоснования и формулирования второго закона термодинамики, но и для установления многих её положений. Статьи *Клаузиуса* разных лет (1848–1862 гг.) были собраны в его классическое сочинение «Механическая теория тепла» [4].

Термодинамический метод исследования, опирающийся на работы *Р. Клаузиуса*, позволил определить характеристики машин Карно и Стирлинга, получить предельные значения их эффективности. Оказалось, что термические КПД  $\eta$  цикла Карно, состоящего из двух изотермических и двух адиабатических процессов, и цикла Стирлинга, содержащего два изотермических и два изохорных регенеративных процесса, равны при одних и тех же заданных температурных пределах (рис. 2). Также было установлено, что термические КПД  $\eta$  прямых циклов Карно и Стирлинга и холодильные коэффициенты  $\epsilon$  этих обратных циклов зависят лишь от температур верхнего и нижнего источников теплоты. Равенство значений  $\eta$  и  $\epsilon$  у рассматриваемых циклов обосновал *И. Вышнеградский*, введя понятие обобщенных циклов Карно [5, 6].