

Ю.В. ДЬЯЧЕНКО,  
М.В. ГОРБАЧЕВ, Н.И. ПАЩЕНКО

# ТЕРМОДИНАМИКА ЦИКЛОВ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

НОВОСИБИРСК  
2011

УДК 629.7.048.3:536.7  
Д 937

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *А.В. Чичиндаев*;  
д-р техн. наук, профессор *Г.В. Ноздренко*

**Дьяченко Ю.В.**

Д 937 Термодинамика циклов авиационных систем кондиционирования воздуха : монография / Ю.В. Дьяченко, М.В. Горбачев, Н.И. Пашенко. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 240 с. (Серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1727-0

Рассмотрены вопросы анализа термодинамических циклов подсистем, входящих в состав авиационных систем кондиционирования воздуха.

Разработаны методики определения термодинамической эффективности идеальных и реальных циклов СКВ в виде холодильных коэффициентов и коэффициентов теплоиспользования, определены области существования и оптимальные условия реализации циклов.

Предложена система усовершенствованной авиационной воздушно-холодильной машины, проведен ее комплексный термодинамический анализ, выявлены преимущества предложенной схемы перед СКВ, установленной на самолете Ту-204.

Монография предназначена для специалистов в области разработки и конструирования авиационных систем кондиционирования воздуха и холодильной техники, а также будет полезна студентам, магистрантам и аспирантам при изучении разделов термодинамики циклов и систем кондиционирования воздуха.

УДК 629.7.048.3:536.7

ISBN 978-5-7782-1727-0

© Дьяченко Ю.В., Горбачев М.В.,  
Пашенко Н.И., 2011  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2011

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

YU.V. D'YACHENKO,  
M.V. GORBACHEV, N.I. PASHCHENKO

# THERMODYNAMICS OF AIRCRAFT AIR CONDITIONING SYSTEM CYCLES

NOVOSIBIRSK  
2011

UDC 629.7.048.3:536.7  
D 937

Reviewers:

Prof. *A.V. Chichindaev*, D.Sc. (Eng.);

Prof. *G.V. Nozdrenko*, D.Sc. (Eng.),

**D'yachenko Yu. V.**

D 937 Thermodynamics of Aircraft Air Conditioning System Cycles : monograph / Yu.V. D'yachenko. M.V. Gorbachev. N.I. Pashchenko. – Novosibirsk : NSTU publisher, 2011. – 240 pp. (“NSTU Monographs” series).

ISBN 978-5-7782-1727-0

Thermodynamic cycles of subsystems of aircraft air conditional systems (ACS) are studied and analyzed.

Calculation methods of thermodynamic efficiency of ideal and actual cycles of ACS as refrigerating and heat utilization factors have been developed. Domains of existence and optimal conditions for implementing the cycles have been found.

A system of an improved aircraft air-refrigerating machine is proposed. Comprehensive thermodynamic analysis of the machine has been carried out and some advantages of the proposed system versus ACS installed on the Tu-204 aircraft have been revealed.

The book is intended for specialists concerned with designing and developing aircraft air conditioning systems and refrigerating machines. It will also be of use for undergraduate, graduate and postgraduate students who study cycle thermodynamics and air conditioning systems.

UDC 629.7.048.3:536.7

ISBN 978-5-7782-1727-0

© Yu.V. D'yachenko, M.V. Gorbachev,  
N.I. Pashchenko, 2011

© Novosibirsk State Technical University, 2011

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список условных обозначений и сокращений .....	7
Предисловие .....	11
Глава 1. <b>Анализ современного состояния и перспективы развития систем кондиционирования воздуха</b> .....	17
1.1. Общая характеристика авиационных систем кондиционирования воздуха.....	17
1.2. Общая характеристика воздушно-холодильных машин .....	18
1.3. Теоретический (обратимый) цикл воздушно-холодильной машины .....	20
1.4. Реальный (необратимый) цикл воздушно-холодильной машины.....	22
1.5. Теоретические циклы регенеративных воздушно-холодильных машин .....	26
1.6. Цикл воздушно-холодильной машины ступенчатого сжатия .....	30
1.7. Обзор воздушно-холодильных машин с регенеративной осушкой влажного воздуха в составе авиационных систем кондиционирования воздуха.....	33
Глава 2. <b>Разработка и исследование термодинамических моделей идеализированных циклов нерегенеративных авиационных систем кондиционирования воздуха</b> .....	47
2.1. Термодинамическая модель идеализированного цикла нерегенеративной СКВ .....	47
2.2. Термодинамическая модель цикла ТИС в составе нерегенеративной СКВ .....	53
2.3. Совместные процессы обратного и прямого циклов нерегенеративной системы кондиционирования воздуха .....	56
2.4. Анализ влияния исходных параметров на удельную работу прямого и обратного циклов нерегенеративной СКВ .....	59
2.5. Анализ оптимальных условий реализации циклов нерегенеративной СКВ .....	62
2.6. Анализ области существования и предельных условий циклов нерегенеративной СКВ .....	69

2.7. Термодинамическая эффективность нерегенеративной авиационной системы кондиционирования воздуха.....	85
2.8. Анализ влияния параметров на расход воздуха, отбираемого нерегенеративной СКВ от компрессора силовой установки .....	90
2.9. Разработка термодинамической модели идеализированной нерегенеративной СКВ ступенчатого сжатия.....	94
<b>Глава 3. Разработка термодинамической модели идеализированных циклов СКВ ступенчатого сжатия .....</b>	<b>103</b>
3.1. Регенеративная система кондиционирования воздуха с двухступенчатым сжатием по схеме .....	103
3.2. Термодинамическая модель обратимого цикла регенеративной АВВХМ с двухступенчатым сжатием .....	105
3.3. Термодинамическая модель идеализированного цикла ТИС в составе регенеративной СКВ с двухступенчатым сжатием.....	109
3.4. Совместные процессы обратного и прямого циклов регенеративной СКВ с двухступенчатым сжатием .....	111
<b>Глава 4. Сравнительный анализ идеализированных термодинамических циклов авиационных систем кондиционирования воздуха .....</b>	<b>117</b>
4.1. Влияние исходных параметров на термодинамическую эффективность прямого и обратного циклов в составе СКВ .....	117
4.2. Сравнительный анализ термодинамической эффективности авиационных систем кондиционирования воздуха .....	122
4.3. Сравнительный анализ влияния исходных параметров на расходные характеристики авиационных систем кондиционирования воздуха.....	125
<b>Глава 5. Разработка программы численного моделирования авиационной системы кондиционирования воздуха .....</b>	<b>129</b>
5.1. Принципиальная и расчетная схемы подсистемы охлаждения .....	130
5.2. Моделирование работы подсистемы охлаждения .....	132
5.3. Математическое моделирование агрегатов авиационной воздушно-холодильной машины .....	133
5.4. Оценка адекватности разработанной программы.....	144
5.5. Результаты численных экспериментов для АВВХМ.....	146
5.6. Моделирование работы СКВ.....	150
5.7. Результаты численного моделирования СКВ .....	152
<b>Глава 6. Термодинамический анализ реальных циклов системы кондиционирования воздуха с двукратной регенерацией .....</b>	<b>155</b>
6.1. Реальные циклы подсистем, входящих в состав СКВ.....	156
6.1.1. Цикл АВВХМ.....	156

6.1.2. Цикл ТИС .....	160
6.2. Влияние исходных параметров на термодинамическую эффективность реальных циклов.....	163
6.3. Влияние влажности атмосферного воздуха на работу реальной АВВХМ в составе авиационной СКВ.....	166
6.4. Влияние влажности атмосферного воздуха на термодинамическую эффективность цикла ТИС.....	175
<b>Глава 7. Анализ влияния характеристик агрегатного состава на термодинамическую эффективность реальных циклов.....</b>	<b>177</b>
7.1. Влияние характеристик агрегатов на термодинамическую эффективность цикла АВВХМ.....	177
7.2. Влияние характеристик агрегатов на термодинамическую эффективность цикла ТИС.....	184
7.3. Влияние рециркуляции cabinного воздуха.....	186
7.4. Оценка необратимых потерь термодинамической эффективности реального цикла АВВХМ.....	188
<b>Глава 8. Комплексный термодинамический анализ циклов усовершенствованной авиационной воздушно-холодильной машины.....</b>	<b>193</b>
8.1. Цикл усовершенствованной авиационной воздушно-холодильной машины.....	193
8.2. Термодинамическая эффективность цикла усовершенствованной АВВХМ.....	196
8.3. Частные случаи и предельные условия существования цикла УАВВХМ.....	201
8.4. Исследование влияния исходных параметров на термодинамическую эффективность цикла УАВВХМ.....	208
8.5. Анализ оптимальных условий реализации цикла УАВВХМ.....	212
8.6. Сравнительный анализ циклов УАВВХМ и АВВХМ с двукратной регенерацией.....	216
8.7. Реальный термодинамический цикл УАВВХМ.....	219
8.8. Влияние исходных параметров на термодинамическую эффективность реального цикла УАВВХМ.....	220
8.9. Сравнительный анализ реальных циклов АВВХМ с двукратной регенерацией и УАВВХМ.....	222
<b>Заключение .....</b>	<b>224</b>
<b>Библиографический список.....</b>	<b>227</b>

## CONTENTS

Notation.....	7
Foreword .....	11
Chapter 1. <b>Analysis of the State-of-the-Art and Prospects of Air Conditioning System</b> .....	17
1.1. General characteristics of aircraft air conditioning systems .....	17
1.2. General characteristics of air refrigerating systems .....	18
1.3. The theoretical (reversible) cycle of the air-refrigerating machine.....	20
1.4. The actual (irreversible) cycle of the air-refrigerating machine .....	22
1.5. Theoretical cycles of regenerative air refrigerating machines .....	26
1.6. The cycle of the air-refrigerating stepwise compression machine .....	30
1.7. A review of air-refrigerating machines with regenerative dehumidification of humid air.....	33
Chapter 2. <b>Design and Analysis of Thermodynamic Models of Idealized Cycles of nonregenerative Aircraft Air Conditioning Systems</b> .....	47
2.1. A thermodynamic model of the idealized cycle in a nonregenerative ACS .....	47
2.2. A thermodynamic model of the TIS cycle in a nonregenerative ACS.....	53
2.3. Combined processes of reversible and direct cycles in a nonregenerative ACS .....	56
2.4. An analysis of the initial parameter effect on specific work of direct and reversible cycles of a nonregenerative ACS .....	59
2.5. An analysis of optimal conditions for implementing nonregenerative ACS cycles .....	62
2.6. An analysis of the existence domain and limiting conditions of nonregenerative ACS cycles.....	69
2.7. Thermodynamic efficiency of a nongenerative aircraft air conditioning system .....	85



2.8. An analysis of the effect of parameters on the consumption of air bled by a nonregenerative ACS from the power plant compressor.....	90
2.9. Development of a thermodynamic model of an idealized nonregenerative stepwise compression ACS.....	94
<b>Chapter 3. Development of a Thermodynamic Model of an Idealized Nonregenerative Stepwise Compression ACS.....</b>	<b>103</b>
3.1. A regenerative air conditioning system with two-step compression as per diagram.....	103
3.2. A thermodynamic model of the reversible cycle of a aircraft air refrigerating machine (AARM) with two-step compression .....	105
3.3. A thermodynamic model of an idealized cycle of TIS of a regenerative ACS with two-step compression.....	109
3.4. Combined processes of reverse and direct cycles of a regenerative ACS with two-step compression .....	111
<b>Chapter 4. Comparative Analysis of Idealized Thermodynamic Cycles of Aircraft Air Conditioning Systems .....</b>	<b>117</b>
4.1. The effect of initial parameters on the thermodynamic efficiency of direct and reverse cycles of ACSs .....	117
4.2. Comparative analysis of the thermodynamic efficiency of aircraft air conditioning systems .....	122
4.3. Comparative analysis of the initial parameter effect on consumption characteristics of aircraft air conditioning systems.....	125
<b>Chapter 5. Development of a Numerical Simulation Program of an Aircraft ACS.....</b>	<b>129</b>
5.1. Schematic and design diagrams of the cooling subsystem .....	130
5.2. Simulation of the cooling subsystem operation .....	132
5.3. Mathematical simulation of aircraft air refrigerating machine units.....	133
5.4. Assessment of the developed program adequacy.....	144
5.5. Results of AARM numerical experiments .....	146
5.6. Simulation of the ACS operation.....	150
5.7. Results of ACS numerical simulation.....	152
<b>Chapter 6. Thermodynamic Analysis of Actual Cycles of an Air Conditioning System with Double Regeneration.....</b>	<b>153</b>
6.1. Actual cycles of ACS subsystems.....	156
6.1.1. The AARM cycle.....	156
6.1.2. The TIS cycle.....	160

6.2. The effect of initial parameters on the thermodynamic efficiency of actual cycles .....	163
6.3. The effect of atmospheric air humidity on the operation of an actual AAMR of an aircraft ACS.....	166
6.4. The effect of atmospheric air humidity on the thermodynamic efficiency of the TIS cycle .....	175
<b>Chapter 7. Analysis of the Effect of the Modular Unit Characteristics on the Thermodynamic Efficiency of Actual Cycles.....</b>	<b>177</b>
7.1. The effect of unit characteristics on the thermodynamic efficiency of the AARM cycle.....	177
7.2. The effect of unit characteristics on the thermodynamic efficiency of the TIS cycle.....	184
7.3. The effect of the cabin air recirculation .....	186
7.4. Assessment of irreversible thermodynamic efficiency losses of the actual AARM cycle .....	188
<b>Chapter 8. Complex Thermodynamic Analysis of Cycles of an Improved Aircraft Air Refrigerating Machine.....</b>	<b>193</b>
8.1. The cycle of an improved aircraft air refrigerating machine .....	193
8.2. Thermodynamic efficiency of the cycle of an improved AARM .....	196
8.3. Particular cases and limiting conditions of the existence of the UAARM cycle.....	201
8.4. Study of the initial parameter effect on the thermodynamic efficiency of the UAARM cycle .....	208
8.5. An analysis of optimal conditions for UAARM cycle implementation.....	212
8.6. Comparative analysis of the UAARM and AARM cycles with double regeneration .....	216
8.7. The actual thermodynamic MAARM cycle.....	219
8.8. The effect of initial parameters on the thermodynamic efficiency of the actual MAARM cycle.....	220
8.9. Comparative analysis of actual AARM cycles with double regeneration and MAARM.....	222
<b>Conclusion.....</b>	<b>224</b>
<b>References .....</b>	<b>227</b>