

УДК 621.433:621.57

А.В. КОНОВАЛОВ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ УВЛАЖНЕНИЕМ ОХЛАЖДАЮЩЕГО И ЦИКЛОВОГО ВОЗДУХА

Проанализировано влияние температуры воздуха на входе турбокомпрессора и наддувочной газозвушной смеси после него на работу газопоршневого двигателя тригенерационной установки автономного энергообеспечения. Показана невозможность эффективной работы газового двигателя при повышенных температурах наружного воздуха в случае применения в системе оборотного охлаждения наддувочной газозвушной смеси градирни сухого типа. Рассмотрена возможность испарительного охлаждения наружного воздуха на входе градирни системы оборотного охлаждения наддувочной газозвушной смеси и воздуха на входе турбокомпрессора газопоршневого двигателя увлажнением воздуха до состояния насыщения.

Ключевые слова: газопоршневой двигатель, испарительное охлаждение, наружный воздух, наддувочная газозвушная смесь, градирня сухого типа.

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Газопоршневые двигатели (ГПД) находят широкое применение в установках автономного энергообеспечения когенерационного (электро- и теплообеспечение) и тригенерационного (электро-, тепло- и холодообеспечение) типов [1–3]. С повышением температуры воздуха на входе термодинамическая эффективность ГПД снижается (уменьшается КПД и, соответственно, возрастает удельный расход топлива). Особенно остро проблема ухудшения топливной эффективности при повышенных температурах наружного воздуха стоит в ГПД установок автономного энергообеспечения (автономных электростанций) с отводом теплоты от наддувочной газозвушной смеси (ГВС) системой оборотного охлаждения с градирнями сухого типа – поверхностными теплообменниками, обдуваемыми наружным воздухом. В таких системах помимо термического сопротивления низкотемпературной ступени охладителя наддувочной смеси (ОНС_{НТ}), определяемого разностью температур между ГВС и водой промежуточного контура охлаждения, имеет место значительное термическое сопротивление в градирне сухого типа из-за разности температур между водой промежуточного контура охлаждения и наружным воздухом. В результате, при повышенных температурах воздуха на входе градирни и, следовательно, воды промежуточного контура охлаждения, система оборотного охлаждения не в состоянии обеспечить

поддержание требуемой температуры ГВС после ОНС_{НТ}, т.е. на входе во впускной ресивер и в рабочие цилиндры двигателя. В случаях превышения температурой ГВС установленного ее значения во впускном ресивере система автоматического регулирования (САР) уменьшает подачу газа в ГПД для поддержания термического состояния двигателя на требуемом уровне и двигатель переходит на доле-вые режимы работы, что сопровождается возрастанием удельного расхода топлива.

Решение этой двуединой задачи, обусловленной двойным влиянием температуры наружного воздуха на температуры циклового воздуха на всасывании наддувочных турбокомпрессоров (ТК) ГПД и наддувочной ГВС на выходе ОНС_{НТ} (на входе во впускной ресивер) возможно путем охлаждения воздуха на входе ТК ГПД и градирни системы оборотного охлаждения. В условиях дефицита воды и невозможности применения одноконтурной системы водяного охлаждения наддувочной ГВС (без использования воздуха в качестве охлаждающей среды) компромиссным решением было бы снижение температуры циклового воздуха (на входе ТК) и охлаждающего воздуха на входе градирни путем испарения воды, распыляемой в воздушном потоке, с отводом от него теплоты испарения воды.

Цель исследования – оценка эффективности применения контактного способа (увлажнением) снижения температуры циклового воздуха на входе ТК ГПД и охлаждающего наружного воздуха на входе градирни системы оборотного охлаждения наддувочной ГВС с учетом климатических условий.

2. Результаты исследования

Когенерационные ГПД применены в первой на Украине установке автономного электро-, тепло- и холодообеспечения завода ООО "Сандора"—"PepsiCo Ukraine" (Николаевская обл.), введенной в эксплуатацию в 2011 г. Проектирование и монтаж установки выполнены ЧНПП "СИНАПС"—"GE Energy" (г. Киев) и ООО "Хладотехника" (г. Николаев). Тригенерационная установка включает 2 когенерационных ГПД JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher (электрическая мощность одного ГПД 1400 кВт, тепловая – 1500 кВт), 2 абсорбционных бромистолитиевых холодильных машины (АБХМ) и 2 центральных кондиционера холодопроизводительностью по 350 кВт и объемным расходом воздуха по 60000 м³/ч каждый. Отвод теплоты от охлаждающей воды наддувочной ГВС осуществляется системой оборотного охлаждения с градирнями сухого типа Еварсо.

Теплота воды, нагретой в утилизационном котле (УК) на выпускных газах ГПД, высокотемпературной ступени охладителя наддувочной смеси (ОНС_{ВТ}), пластинчатых теплообменниках (ТО) водяного охлаждения рубашки двигателя и смазочного масла, используется в АБХМ для производства холода в виде охлажденной воды с температурой 7...10 °С. Охлажденная вода является холодоносителем для двух центральных кондиционеров, из которых охлажденный и осушенный воздух подается в машинное отделение (МО) когенерационных ГПД, а оттуда – на всасывание наддувочных турбокомпрессоров (ТК) ГПД. Остальная часть холода используется для технологического охлаждения (при пастеризации соков и т.п.).

Как показал первый год эксплуатации тригенерационной установки, системы охлаждения не совсем справляются с задачей обеспечения высокой топливной эффективности ГПД (малых удельных расходов газа b_e) при повышенных температурах $t_{нв}$ наружного воздуха и, соответственно, воздуха на входе двигателей $t_{вх.}$. Решение этой задачи усложняется, во-первых, большими объемами приточного воздуха МО, охлаждаемыми в центральных кондиционерах, во много раз превышающими расходы воздуха на ГПД, что исключает возможность глубокого снижения температуры воздуха на входе двигателей $t_{вх.}$, и, во-вторых, применением в системе оборотного охлаждения наддувочной ГВС градирен сухого (поверхностного) типа и, следовательно, наличием значительного термического сопротивления.

При повышенных температурах наружного воздуха ($t_{нв}$ свыше 25 °С) на входе ТК ГПД и градирен из-за довольно существенных разностей температур в градирнях, между водой промежуточного контура охлаждения ГВС и наружным воздухом, обдувающим теплообменные поверхности градирен (8...10 °С), а также между наддувочной ГВС и охлаждающей водой в ОНС_{НТ} система охлаждения не обеспечивает поддержание температуры ГВС во впускном ресивере на уровне, соответствующем настройке системы автоматического регулирования (САР) подачи газа на двигатель. И тогда при превышении температурой ГВС установленного ее значения (в данном случае 40 °С) САР уменьшает подачу газа в ГПД и двигатель переходит на долевы режимы работы, что сопровождается возрастанием удельного расхода топлива по сравнению с его работой на номинальном режиме (рис. 1).

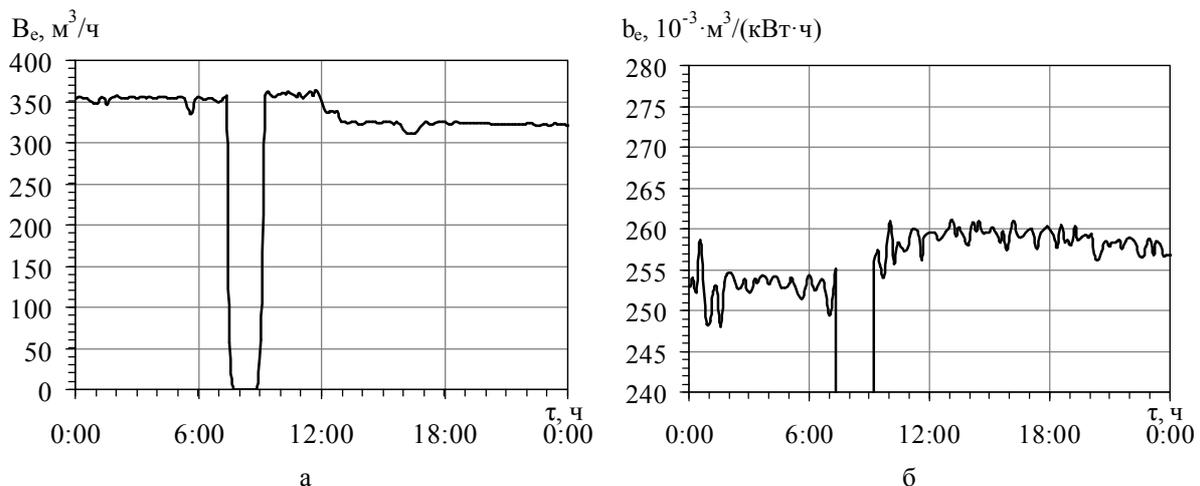


Рис. 1. Изменение полного расхода газа V_e (а) и удельного расхода газа b_e (б) на двигатель JMS 420 GS-N.LC GE (28.07.2011)

Из рис. 1 видно, что в дневные часы (при $\tau = 11-00 \dots 22-00$ ч), когда имеют место повышенные температуры наружного воздуха $t_{нв}$, на входе в градирни системы оборотного охлаждения наддувочной ГВС (соответственно охлаждающей воды на входе ОНС_{НГ}), в конечном счете, и ГВС во впускном ресивере двигателя, а также воздуха на всасывании ТК ГПД $t_{вх}$ (рис. 2,а), ГПД работает на долевых режимах с возрастанием удельного расхода газа b_e примерно на $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$, т.е. на 2 % по сравнению с работой ГПД на полной нагрузке при температурах $t_{нв}$ и $t_{вх}$ ниже $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\tau = 2-00 \dots 6-00$ ч.). При высоких температурах воздуха в МО в зоне ГПД и ухудшении отвода теплоты от корпуса двигателя, например, при отключении кондиционеров ($\tau = 8-$

$00 \dots 10-00$ ч), возможно полное прекращение подачи газа системой САР, чтобы исключить недопустимое повышение температурного уровня двигателя (рис. 1,а).

Свести к минимуму работу ГПД на долевых режимах (при $\tau = 11-00 \dots 22-00$ ч, рис. 1) и тем самым уменьшить удельный расход газа b_e можно снижением температуры воздуха на входе ТК и воздушного потока на входе градирни сухого типа. Как один из вариантов – охлаждение воздуха путем испарения капельной влаги, распыляемой в воздушном потоке (контактный метод). Увлажняя воздух до состояния насыщения, за счет отвода от него теплоты на испарение воды, можно охлаждать воздух до температуры по мокрому термометру t_m (рис. 2).

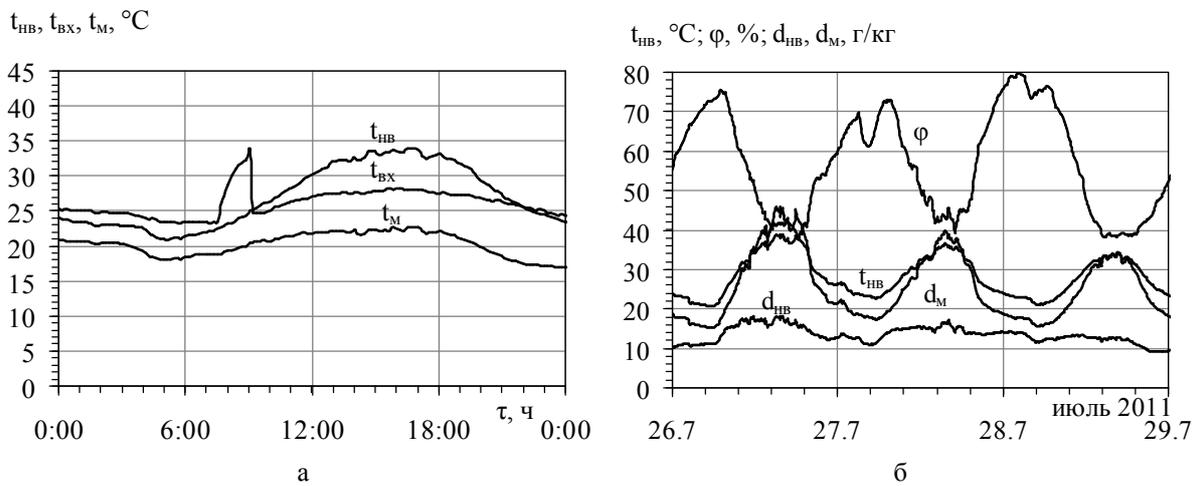


Рис. 2. Значения температуры наружного воздуха $t_{нв}$, воздуха $t_{вх}$ на входе ТК ГПД (охлажденного в кондиционере приточного воздуха) и воздуха по мокрому термометру t_m (насыщенного воздуха) в течение суток 28.07.2011 (а), а также относительной влажности ϕ и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха в течение трех суток 26.07...28.07.2011 (б)

Как видно, насыщая воздух влагой, можно охлаждать его до температуры t_m , которая ниже температуры не только наружного воздуха $t_{нв}$ (причем существенно ниже при повышенных температурах $t_{нв}$, рис. 2,а), но и воздуха на входе ТК ГПД $t_{вх}$ (рис. 2,б). В последнем случае увлажненный до состояния насыщения воздух следует подавать не в МО, а непосредственно к фильтру на входе всасывающего тракта ТК ГПД.

Благодаря испарительному охлаждению наружного воздуха до температуры мокрого термометра t_m происходит снижение его температуры на величину $\Delta t_m = t_{нв} - t_m$, причем весьма значительную при наиболее неблагоприятных условиях – высоких температурах $t_{нв} = 25 \dots 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\tau = 12-00 \dots 20-00$ ч, рис. 2).

При этом, как видно из рис. 3, увеличение влагосодержания Δd_m наружного воздуха в результате его увлажнения от текущего ненасыщенного состояния (влагосодержание $d_{нв}$) до состояния насыщения (влагосодержание d_m), т.е. $\Delta d_m = d_m - d_{нв}$, меняется в течение суток весьма сильно: от $\Delta d_m = 5 \text{ г/кг с.в.}$ (0,5 % массового расхода воздуха) в ночные и утренние часы ($\tau = 0-00 \dots 8-00$ ч) до $\Delta d_m = 15 \dots 20 \text{ г/кг с.в.}$ (1,5...2,0 %), в часы максимальных температур $t_{нв} = 25 \dots 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\tau = 12-00 \dots 20-00$ ч), когда требуется снижение температуры воздуха на входе ТК и наддувочного воздуха до более низких температур, исключающих эксплуатацию ГПД на долевых режимах.

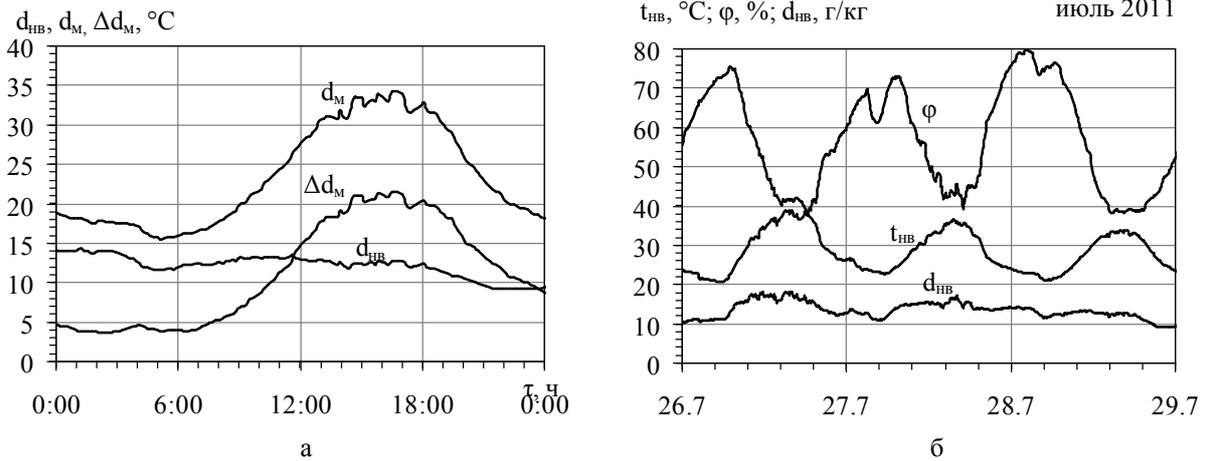


Рис. 3. Значения влагосодержания наружного воздуха $d_{нв}$ и воздуха в состоянии насыщения d_m , наружного воздуха $t_{нв}$ (а) и воздуха $t_{вх}$ на всасывании ТК ГПД (б) в течение суток 28.07.2011 (а) и трех суток 26.07...28.07.2011 (б)

Сравнительно невысокая температура увлажненного воздуха $t_m < 25^\circ\text{C}$ на входе ТК ГПД и градирни системы оборотного охлаждения ГВС в течение дня обеспечивает поддержание температуры наддувочной ГВС во впускном ресивере ГПД на уровне 40°C при повышенных температурах наружного воздуха $t_{нв}$. Из рис. 2,а видно, что подача в градирни воздуха с температурой t_m , которая практически на 10°C ниже $t_{нв}$ в часы наиболее высоких температур $t_{нв}$ ($\tau = 12-00...20-00$ ч), вызывает соответствующее (на 10°C) снижение температуры воды системы оборотного охлаждения наддувочной ГВС и, в конечном счете, ГВС во впускном ресивере

ГПД (тоже на 10°C). Пониженные температуры насыщенного воздуха $t_m < 25^\circ\text{C}$ на входе ТК ГПД и градирни обеспечивают стабильную, в течение суток, работу ГПД на номинальном режиме при минимальных удельных расходах газа $b_c = (253...255) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$, как в промежутке $\tau = 2-00...6-00$ ч при температурах $t_{нв} < 25^\circ\text{C}$ (рис. 1,б).

Значения количества воды, расходуемой на увлажнение воздуха на входе ТК ГПД JMS 420 GS-N.LC GE (электрическая мощность 1400 кВт, расход циклового воздуха 2 кг/с) до состояния насыщения в течение суток W_m и ее часовой расход G_m приведены на рис. 4.

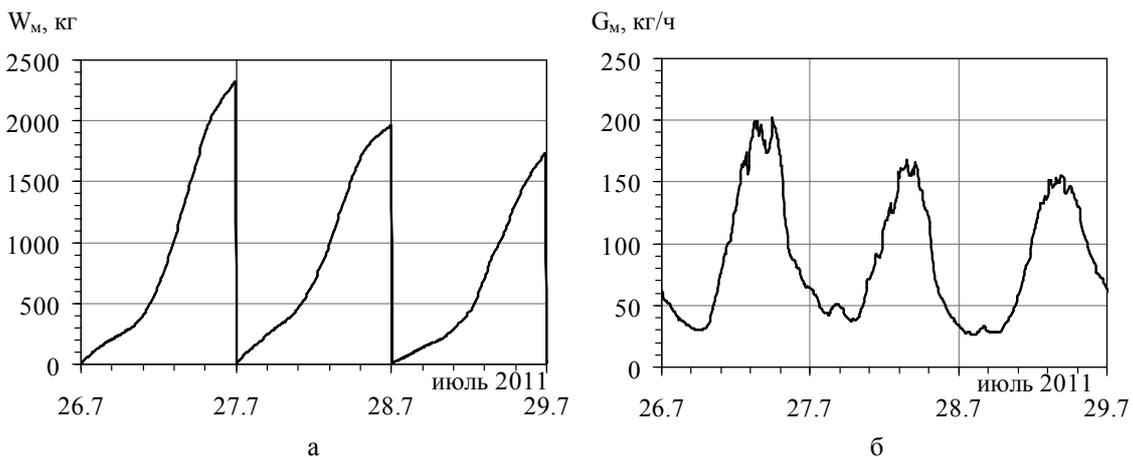


Рис. 4. Количество воды, расходуемой на увлажнение воздуха на входе ГПД JMS 420 GS-N.LC GE (расход циклового воздуха 2 кг/с) до состояния насыщения в течение суток W_m (а) и ее часовой расход G_m (б)

Как видно, для увлажнения воздуха на входе ТК ГПД JMS 420 GS-N.LC GE с расходом 2 кг/с до состояния насыщения при указанных климатических условиях (рис. 2) каждые сутки потребуется

1500...2500 кг дистиллированной воды (рис. 4,а). При этом наибольшие расходы впрыскиваемой воды приходятся на часы повышенных температур наружного воздуха $t_{нв} = 25...35^\circ\text{C}$ ($\tau = 12-00...20-00$ ч,

рис. 4,б). Расход воды на увлажнение наружного воздуха на входе градирни системы оборотного охлаждения наддувочной ГВС определяют из тепловых балансов охладителя ГВС ОНС_{HT} системы оборотного охлаждения и градирни сухого типа с учетом более глубокого (на 8...10 °С, как и $\Delta t_m = t_{нв} - t_m$ на рис. 2) снижения температуры ГВС по сравнению с традиционным охлаждением воды в градирне неувлажненным наружным воздухом. Оценочные расчеты показывают, что в часы максимальных температур наружного воздуха ($\tau = 12-00...20-00$ ч, рис. 2) расходы воды на его увлажнение до состояния насыщения на входе градирни с понижением температуры воздуха на величину $\Delta t_m = t_{нв} - t_m = 10$ °С составляют около 600 кг/ч.

Выводы

Показана эффективность охлаждения наружного воздуха на входе в градирню системы оборотного

Поступила в редакцию 22.10.2012, рассмотрена на редколлегии 14.11.2012

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В.А. Голиков, Одесская национальная морская академия

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЗОПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ ЗВОЛОЖЕННЯМ ОХОЛОДЖУЮЧОГО ТА ЦИКЛОВОГО ПОВІТРЯ

А.В. Коновалов

Проаналізовано вплив температури повітря на вході турбокомпресора та наддувної газоповітряної суміші після нього на роботу газопоршневого двигуна тригенераційної установки автономного енергозабезпечення. Показана неможливість ефективної роботи газового двигуна при підвищених температурах зовнішнього повітря у випадку застосування в системі оборотного охолодження наддувної газоповітряної суміші градирні сухого типу. Розглянута можливість випарного охолодження зовнішнього повітря на вході градирні системи оборотного охолодження наддувної газоповітряної суміші та повітря на вході турбокомпресора газопоршневого двигуна зволоженням повітря до стану насичення.

Ключові слова: газопоршневий двигун, випарне охолодження, зовнішнє повітря, наддувна газоповітряна суміш, градирня сухого типу.

INCREASING EFFICIENCY OF RECIPROCATING GAS ENGINES BY HUMIDIFYING COOLING AND CYCLE AIR

A.V. Konovalov

The influence of turbocharger intake air and compressed gas-air mixture temperature upon the performance of reciprocating gas engine of trigeneration plant of integrated energy system is analyzed. The impossibility of efficient performance of gas engine at increased ambient air temperatures in the case of application of dry type cooling tower in closed cooling system for charged gas-air mixture is shown. The possibility of evaporating cooling of ambient air at the inlet of cooling tower in closed cooling system for charged gas-air mixture and air at the inlet of reciprocating gas engine turbocompressor by humidifying the air to saturated condition.

Key words: reciprocating gas engine, evaporating cooling, ambient air, compressed gas-air mixture, cooling tower of dry type.

Коновалов Андрей Викторович – аспирант, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев, Украина, e-mail: konovalov.ava@gmail.com.

охлаждения наддувочной газозвдушной смеси и воздуха на входе турбокомпрессора газопоршневого двигателя установки автономного энергообеспечения увлажнением воздуха до состояния насыщения.

Литература

1. *Elsenbruch, T. Jenbacher gas engines a variety of efficient applications [Text] / T. Elsenbruch–București, October 28, 2010. – 73 p.*

2. *Economic utilization of Biomass and Municipal Waste for power generation. Some energy lasts for generations [Text] // GE Jenbacher Company Overview. – June 13, 2007. – 39 p.*

3. *GTI Integrated Energy System for Buildings. Modular System Prototype [Text] / G. Rouse, M. Czachorski, P. Bishop, J. Patel // GTI Project report 15357/65118: Gas Technology Institute (GTI). – January 2006. – 495 p.*