

УДК 621.438

Когенерационная газотурбинная установка в составе малой модульной биогазовой станции

Абросимов К.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»*

Научный руководитель: Тумашев Р.З., к.т.н, доцент

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

turbosh@power.bmstu.com

Введение

В связи с растущей общественной поддержкой идей энерго и природосбережения, во всех сферах экономической деятельности человека на передний план выходят именно те технические решения, в которых эти идеи находят своё отражение. Не исключением в этом является и животноводство.

Одной из ключевых экологических проблем животноводческих хозяйств является безопасное удаление или использование продуктов жизнедеятельности животных. Проверенным и эффективным решением этой проблемы являются биогазовые установки (БГУ) анаэробного сбраживания. В крупных хозяйствах установки этого типа, как правило, создаются по индивидуальным проектам. Для малых хозяйств инвестиции в подобные проекты являются нецелесообразными. Поэтому Всероссийским институтом электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ) был предложен модульный вариант таких установок [1], позволяющий в широких пределах варьировать производительностью установок и имеющий ряд других преимуществ, о которых будет сказано ниже.

Малые модульные биогазовые установки

Биогазовые установки ориентированы на решение ряда естественных проблем животноводческих хозяйств [2]:

- загрязнение почвы и гидросферы непереработанными навозными стоками
- загрязнение атмосферы газообразными продуктами естественного разложения продуктов жизнедеятельности животных

- обеспечение бесперебойного электроснабжения и электроснабжения в удалённых районах
- снижение стоимости электро и теплоснабжения
- получение дополнительного дохода от реализации высокоэффективных удобрений

Модульные БГУ для малых животноводческих хозяйств имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционным конструктивным решением для биогазовых станций:

- снижены затраты на проектирование систем разной производительности в связи с использованием универсальных модулей
- в качестве модулей-метантенков могут использоваться отработавшие железнодорожные цистерны, что значительно снижает общую стоимость БГС
- ремонт системы может осуществляться с частичным сохранением её работоспособности
- облегчённый ввод системы в эксплуатацию, в том числе, за счёт сокращения времени перехода биологической системы внутри модулей в устойчивое состояние по сравнению с метантенками большего объёма

Схема ГТУ

На рисунке 1 представлена нетрадиционная схема ГТУ с изменённой очередностью процессов, предложенная в качестве энергетической машины для модульной БГС, преимущества которой в сравнении с аналогами будут показаны ниже.

В предложенной схеме атмосферный воздух при атмосферном давлении проходит через теплообменник-регенератор, поступает в камеру сгорания, а затем в турбину. После турбины продукты сгорания при давлении ниже атмосферного проходят через теплообменник-регенератор, затем через газоохладитель (ГО1), оснащённый водосливом (ВС) для удаления влаги, конденсирующейся на стенках газоохладителя, далее поступают в компрессор, где давление рабочего тела восстанавливается практически до атмосферного. Перед выходом в атмосферу газ проходит ещё один теплообменный аппарат-газоохладитель (ГО2).

В качестве топлива в камере сгорания используется биогаз с содержанием CH_4 64% и теплотой сгорания 34.5 МДж/кг, поступающий в камеру сгорания из газгольдера. Теплоносителем в газоохладителях является вода или другой жидкий теплоноситель с пониженной температурой замерзания для предотвращения промерзания труб в случае прекращения работы системы в зимнее время.

Газоохладительные теплообменные аппараты по стороне холодного теплоносителя объединены в общую схему для того, чтобы использовать только один насос. Контроль расхода теплоносителя осуществляется с помощью задвижек (не изображены на схеме). Из соображений увеличения надёжности можно разделить схему на две части, используя дополнительный насос. Оба варианта осуществимы благодаря использованию баков с горячей и холодной водой (БГВ и БХВ), которые также позволяют гибко изменять в системе количество горячей воды поступающей на различные нужды хозяйства, в том числе на: подогрев свежей порции навоза, отопление, хозяйственные нужды. БГВ покрыт теплоизоляцией, а БХВ рёбрами охлаждения.

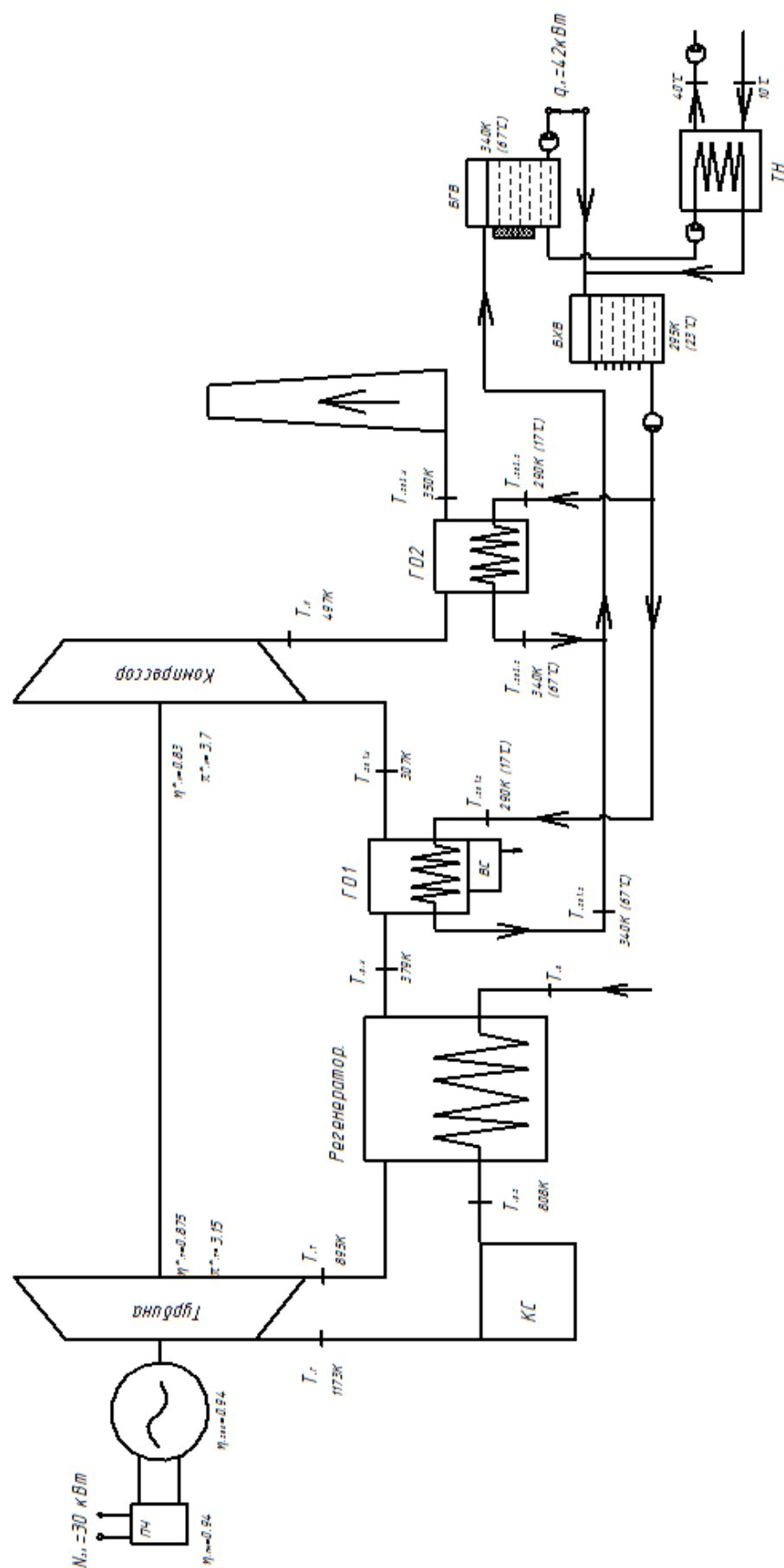


Рис. 1. Схема ГТУ с изменённой очередностью процессов (схема 1)
ГО1, ГО2 – газоохладители; ТН – теплообменник навозоподогревателя;
БГВ – бак горячей воды; БХВ – бак холодной воды; ВУ – водослив

В связи с высокой оптимальной частотой вращения турбомашин с малыми осевыми размерами, генерация электроэнергии осуществляется в высокочастотном генераторе на постоянных магнитах. В преобразователе частоты (ПЧ) высокочастотный переменный ток преобразуется сначала в постоянный, а затем снова в переменный с частотой 50 Гц.

Термодинамический цикл

Термодинамический цикл рассматриваемой ГТУ представлен на рисунке 1.

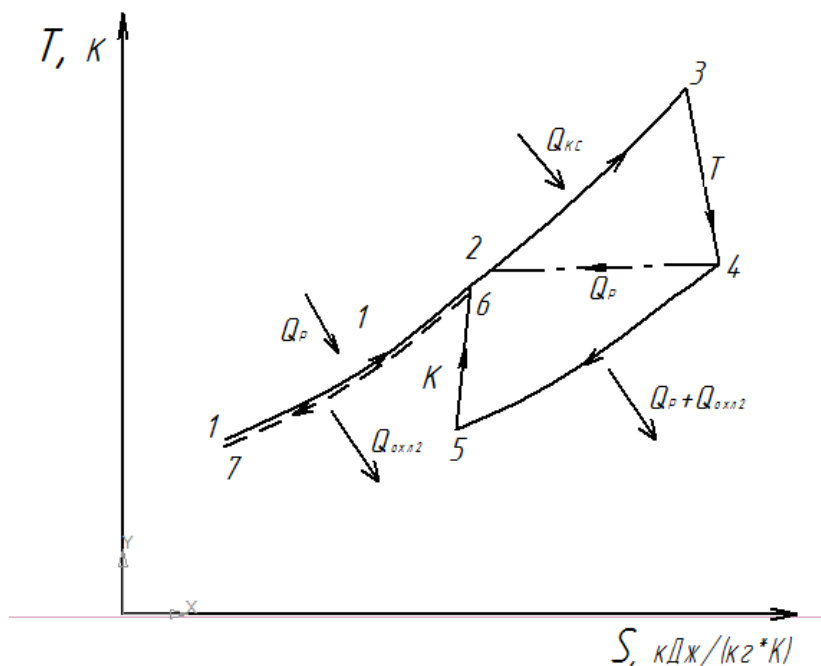


Рис. 2. Термодинамический цикл установки

(1-2) – нагрев воздуха в теплообменнике регенератора; (2-3) – нагрев рабочего тела в камере сгорания; (3-4) – расширения рабочего тела в турбине; (4-5) – охлаждение рабочего тела в теплообменнике регенератора и газоохладителе; (5-6) – сжатие рабочего тела в компрессоре; (6-7) – охлаждение рабочего тела во втором газоохладителе и атмосфере;
линия (4-2) – передача теплоты в регенераторе

Сравнительный анализ

При одинаковых граничных температурах классическая схема имеет небольшое преимущество с термодинамической точки зрения, но рассматриваемая схема, рабочее тело в которой находится при пониженном давлении, имеет ряд преимуществ [3,4,5], так как позволяет:

- использовать биогаз при его естественном давлении в газгольдере 1.4 – 1.6 атм. [2] без применения дожимного компрессора, так как давление в камере сгорания

примерно равно атмосферному. В традиционных схемах дожимной компрессор снижает общий КПД установки на 3-4 %

- использовать одноступенчатые радиальные турбомашин в связи с низкой оптимальной степенью повышения давления в компрессоре ($\pi^*_{\text{К.опт}}=3..4$)
- получить преимущество в КПД лопаточных машин в связи с уменьшением относительных радиальных зазоров

В условиях решаемой инженерной задачи альтернативой ГТУ может быть газопоршневой двигатель (ГПД). В условиях мелко и среднесерийного производства стоимость ГПД может быть несколько ниже стоимости ГТУ равной мощности в связи с использованием более дешёвых материалов и менее сложных технологических операций. Однако ГТУ в описанной компоновке имеет несколько существенных преимуществ по сравнению с ГПД:

- срок эксплуатации до капитального ремонта 100 000 часов
- пониженные выбросы NO_x
- невысокий уровень шума и вибрации
- пониженные эксплуатационные расходы

При проектировании ГТУ с изменённой очередностью процессов были рассмотрены два варианта расположения теплообменных аппаратов в схеме: с газоохладителем ГО1 после регенератора - схема 1 (см. рис. 1), и газоохладителем до регенератора – схема 2. ГТУ, выполненная по схеме 2, позволяет получать больше полезной тепловой энергии, но обладает значительно более низким электрическим КПД. В связи с изменённой очередностью процессов ГТУ удобнее производить расчёт через оптимизацию степени понижения давления в турбине, а не степени повышения давления в компрессоре [6]. Зависимости расхода воздуха и удельного расхода топлива (расход топлива на единицу мощности) представлены на рисунках 3 и 4. Оптимальная с точки зрения удельного расхода топлива степень понижения давления для ГТУ по схеме 1 равна $\pi^*_{\text{Т.опт}}=3.15$ (степень повышения давления в компрессоре $\pi^*_{\text{К.опт}}=3.68$). Для схемы 2 – $\pi^*_{\text{Т.опт}}=5$ и $\pi^*_{\text{К.опт}}=5.85$. Этот результат показывает, что в первом случае возможно применение одноступенчатых радиальных дозвуковых лопаточных машин, в то время как для ГТУ по схеме 2 спроектировать такие машины с высоким КПД представляется затруднительным.

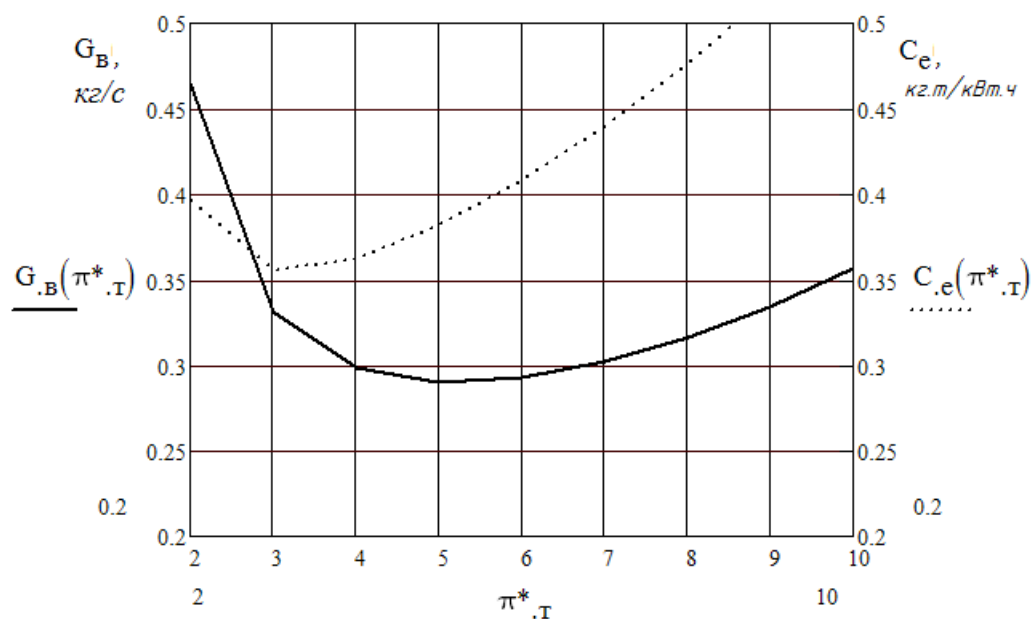


Рис. 3. Зависимость параметров ГТУ по схеме 1 от степени понижения давления в турбине

G_B – расход воздуха; C_e – удельный расход топлива

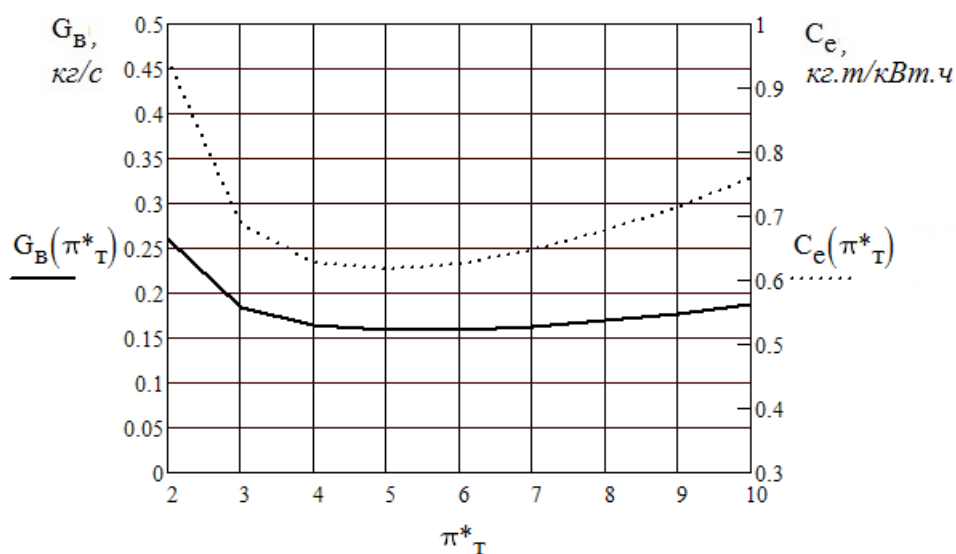


Рис. 4. Зависимость параметров ГТУ по схеме 2 от степени понижения давления в турбине

G_B – расход воздуха; C_e – удельный расход топлива

В таблице 1 представлены результаты расчетов для трёх случаев: ГТУ по схеме 1 при оптимальной степени понижения давления в компрессоре $\pi^*_{T.опт}=3.15$ – «схема 1», ГТУ по схеме 2 при оптимальной степени понижения давления в компрессоре $\pi^*_{T.опт}=5$ – «схема 2_опт», ГТУ по схеме 2 с $\pi^*_{T.опт}=3.15$ – «схема 2_реал».

Расчёт параметров ГТУ произведён для объёма биогаза, поступающего от БГУ с производительностью 14 м³ переработанного навоза в сутки. В расчёте были приняты параметры теплообменных аппаратов, представленные в таблице 2.

Таблица 1

Основные характеристики ГТУ

	Схема 1	Схема 2_опт	Схема 2_реал.
Электрический КПД	29.2	18.7	17.9
Электрическая мощность, кВт	33	21	20
Полезная теплота, кВт	62	95	100
π^*_k	3.15	5.45	3.15

где полезная теплота – теплота, переданная промежуточному теплоносителю в газоохладителях ГО1 и ГО2.

Таблица 2

Характеристики теплообменных аппаратов

	Схема 1		Схема 2_опт		Схема 2_реал	
	σ_p	R	σ_p	R	σ_p	R
Регенератор	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
ГО1	0.55	0.81	0.1	0.55	0.1	0.55
ГО2	0.25	0.71	0.2	0.7	0.2	0.7

где σ_p – степень регенерации; R – степень подогрева

Принятые степени регенерации и подогрева обусловлены, во-первых, оптимальной с точки зрения дальнейшего использования температурой охлаждающего теплоносителя (65-70°C) и его первоначальной температурой (15-20 °C), во-вторых, получением приемлемых массогабаритных характеристик теплообменных аппаратов.

Как видно из данных таблицы 1, ГТУ по схеме 1 обладает значительно более высоким КПД, а ГТУ, выполненная по схеме 2, вырабатывает на 50-60% больше полезного тепла. Таким образом, в случае большей потребности хозяйства именно в тепловой энергии представляется целесообразным использование схемы 2 с $\pi^*_k=3.15$. В связи с тем, что животноводческие хозяйства, как правило, нуждаются в большом количестве именно электрической энергии, окончательно был сделан выбор в пользу схемы 1.

При расчёте параметры узлов принимались равными:

$\sigma_{\text{КС}}=0.965$ – коэффициент сохранения полного давления в камере сгорания

$\eta_{\text{КС}}=0.99$ – КПД камеры сгорания

$T^*_\Gamma = 1173 \text{ К}$ – температура продуктов сгорания после камеры сгорания

$\eta^*_{\text{Т.п}}=0.89$ – политропический КПД турбины

$\eta^*_{\text{Т.п}}=0.86$ – политропический КПД турбины

$T^*_{\text{К0}} = 305...310 \text{ К}$ – температура рабочего тела перед компрессором

В результате расчёта были получены следующие параметры ГТУ:

$G_\Gamma = 2.7 \text{ л/с}$ – расход топлива (биогаза)

$G_\text{В} = 0.241 \text{ кг/с}$ – расход воздуха в ГТУ

$\pi^*_\Gamma=3.15$ – степень понижения давления в турбине

$\pi^*_\text{Т}=3.7$ – степень повышения давления в компрессоре

$\eta^*_{\text{Т}}=0.874$ – расчётный мощностной КПД турбины

$\eta^*_{\text{Т}}=0.832$ – расчётный адиабатный КПД компрессора

$T^*_\Gamma = 896 \text{ К}$ – температура рабочего тела за турбиной

$T^*_\text{К} = 479 \text{ К}$ – температура рабочего тела за компрессором

Заключение

Предлагаемая газотурбинная установка является эффективным решением задачи электро и теплоснабжения для малой модульной БГС. Состоит из двух радиальных одноступенчатых лопаточных машин и трёх теплообменных аппаратов, благодаря которым удаётся не только достичь высокого значения КПД (29.2%), но и обеспечить животноводческое хозяйство большим количеством тепловой энергии. Схема ГТУ с изменённой очередностью процессов отличается от классических тем, что работает при давлении в камере сгорания ниже атмосферного. В таком случае нет необходимости в использовании дожимного компрессора для биогаза, что дополнительно увеличивает абсолютное значение КПД на 3-4% от КПД по сравнению с традиционной схемой ГТУ и снижает величину капитальных и эксплуатационных затрат.

Список литературы

1. Ковалев Д.А., Ковалев А.А. Концепция блочно-модульного построения биогазовых установок // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: труды межд. науч.-техн. конф. Подольск, 2008. Т. 4. С. 461-466.
2. Семенов И.В. Проектирование биогазовых установок. Сумы: Изд. Мрия-1, 1996. 347 с.
3. Осипов М.И., Тумашев Р.З., Моляков В.Д. ГТУ малой мощности на топливных газах низкого давления с измененной очередностью процессов термодинамического цикла // Междунар. научно-практическая конф. «Малая энергетика — 2003»: Труды. Обнинск, 2003. С. 340–343.
4. Тумашев Р. З., Бодров Н.Г. Когенерационная газотурбинная установка на попутных нефтяных газах с высоким содержанием тяжёлых углеводородов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012, №7. С. 155-165.
5. Осипов М.И., Тумашев Р.З., Моляков В.Д. Усовершенствование ГТУ малой мощности при использовании топливных газов низкого давления // Труды Междунар. науч.-практич. конф. «Малая энергетика-2004». Москва, 2004. С. 113–116.
6. Турбомашины и МГД-генераторы газотурбинных и комбинированных установок / В.С. Бекнев, В.Е. Михальцев, А.Б. Шабаров, Р.А. Янсон. М.: Машиностроение, 1983. 392 с.