

## МЕТОД УЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ СХЕМ И ПАРАМЕТРОВ ПГУ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Анкудинова М.С.<sup>1</sup>, Ларин Е.А.<sup>1</sup>, Обозов К.Э.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (410054, Саратов, ул. Политехническая, 77), e-mail: [ankudinova1608@gmail.com](mailto:ankudinova1608@gmail.com)

Предложена вероятностная модель и методика учета неопределенности информации о значениях показателей надежности элементов ПГУ и установок в целом на выбор оптимальных схемно-параметрических решений. В основу методики положено представление расчетных значений единичных или комплексных показателей надежности как случайных величин, распределенных по какому-либо вероятностному закону. Введено понятие информативности расчетных и «истинных» значений показателей надежности. Априори принято, что значения показателей надежности, полученные по результатам эксплуатации оборудования, обладают более высокой информативностью. Разработанная методика учитывает влияние отклонения «истинного» и расчетных значений как изменение информативности на выбор оптимальных параметров парогазовых установок, так и на изменение критерия эффективности оптимальных решений. Методические положения учета неопределенности информации о показателях надежности могут быть использованы при оптимизации параметров ПГУ с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии в системах теплоэнергоснабжения и оценке устойчивости выбранных схемных решений.

Ключевые слова: парогазовая установка, оптимизация, неопределенность информации, надежность, вероятностная модель, устойчивость.

## ACCOUNTING METHOD OF AMBIGUITY OF RELIABILITY INFORMATION IN CASE OF COMBINED CYCLE GAS TURBINE CONFIGURATION AND PARAMETER OPTIMAZATION IN POWER SUPPLY SYSTEM

Ankudinova M.S.<sup>1</sup>, Larin E.A.<sup>1</sup>, Obozov K.E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Yuri Gagarin Saratov State Technical University (77, Politechnicheskaya street, Saratov, Russia, 410054), e-mail: [ankudinova1608@gmail.com](mailto:ankudinova1608@gmail.com)

Stochastic model and accounting method of ambiguity of CCGT elements and plants reliability indices are described in the article. According to the method calculated values of simple and integrated reliability measures are prescribed like normally distributed random variables. The concept of informativeness of calculated and correct reliability measures is introduced in the article. Besides that observed reliability measures have a priori better informativeness. Effect of calculated and correct reliability measures deviations on optimal parameter choice and variation of efficiency criteria of optimal solutions are taken in consideration in the developed methodology. The influence of reliability indices ambiguity on configuration and parameter optimization are estimated. The accounting method of reliability indices ambiguity is available for parameter optimization of CCGT power plants in Power Supply System. As well as this method is useful in estimation of solution stability of selected configuration.

Keywords: combined cycle gas turbine power plant, optimization, ambiguity of information, reliability, stochastic model solution stability

Совершенствование бинарных парогазовых установок (ПГУ) связано с повышением температуры газа перед газовой турбиной, начальных параметров пара, усложнением тепловых схем установок, комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии, реализацией их конкурентных преимуществ (в частности, термодинамической эффективности и маневренных характеристик) в системах теплоэнергоснабжения. Большой комплекс научных исследований в обоснование создания ПГУ высокой энергетической эффективности проведен научными школами ОАО ВТИ, НИУ «МЭИ», Саратовского ГТУ

имени Гагарина Ю.А., Ивановского и Новосибирского ГТУ и другими организациями. Указанными исследованиями установлено, что повышение термодинамической эффективности ПГУ связано с усложнением их схем и приводит к снижению надежности работы ПГУ в системах теплоэнергоснабжения [1-4].

Управление надежностью при создании энергетического оборудования, установок в целом и систем энергообеспечения на их основе с целью оптимизации конструктивных, технологических, схемных и эксплуатационных решений требует разработки методов и методик расчета единичных показателей надежности (ПН) элементов энергооборудования, главным образом безотказности. Поэтому расчет ПН элементов энергооборудования ПГУ должен базироваться на основе вероятностных методов, позволяющих учесть статистическое рассеяние характеристик прочности и нагруженности с использованием теории случайных величин и случайных функций. Модели надежности энергооборудования и энергоустановок в целом создаются на основе анализа их функционального назначения с учетом действительных факторов и условий работы, достоверности исходной информации, требуемой точности результата оценки надежности. Поэтому методы расчета показателей надежности ПГУ и систем теплоэнергоснабжения на их основе должны базироваться на вероятностных моделях, учитывающих как схемные решения, так и требования потребителей по покрытию электрических и тепловых нагрузок. Разработанный авторами в [3,4] комплекс вероятностных методов и моделей расчета единичных, комплексных и интегральных ПН позволил выявить влияние термодинамических параметров и расходных характеристик рабочих тел, конструктивных и схемных решений на их численные значения, что позволяет учесть факторы надежности при оптимизации параметров и схемных решений ПГУ. Очевидно, что точность полученных расчетных значений ПН элементов оборудования и ПГУ в целом определяется точностью математических моделей, точностью принимаемых исходных данных и погрешностью расчетов, т.е. расчетные значения ПН являются вероятностно неопределенными. Таким способом ставится задача учета неопределенности расчетных значений ПН элементов энергооборудования, ПГУ в целом и систем теплоэнергоснабжения на выбор оптимальных параметров и устойчивость полученных оптимальных решений.

### **Основные методические положения**

Задача оптимизации термодинамических параметров рабочих тел, конструктивных характеристик оборудования и схемных решений отопительных ПГУ в системах теплоэнергоснабжения ставится следующим образом: максимизировать (минимизировать) критерий оптимальности  $R [X, Y, Z]$  при условии, что расчетные значения принятых  $ПН_r$  окажутся не ниже нормативных (оптимальных) значений  $ПН^*$ , т.е.:

$$R [X, Y, Z] \rightarrow \max (\min) \quad \text{при условии } ПНр \geq ПН^*, \quad (1)$$

где  $X, Y, Z$  – соответственно, комплекс оптимизируемых термодинамических параметров рабочих тел, конструктивных характеристик оборудования и схемных и компоновочных решений, заданных внешних условий функционирования ПГУ в системах теплоэнергоснабжения и исходных технико-экономических факторов.

Расчетные значения принятых  $ПНр$  определяются схемными решениями ПГУ, значениями комплексных и единичных показателей надежности элементов основного энергетического оборудования.

Решение поставленной задачи рассмотрим на примере оптимизации термодинамических параметров и схемных решений структурно сложных ПГУ с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии в условиях, когда расчетные значения показателей надежности отдельных элементов ПГУ являются вероятностно неопределенными. Как показано в [3], рассчитанные значения интенсивностей отказов котла-утилизатора ПГУ  $\lambda$  являются случайными величинами. Точность расчетов значений  $\lambda$  определяется точностью математической модели термонапряженного состояния трубного пучка КУ, точностью принятого метода расчета безотказности и точностью исходных данных и расчетов. Это обуславливает неопределенность полученных решений, т.е. неопределенность исходной информации о значениях безотказности трубного пучка КУ при расчете значений коэффициентов готовности  $K_G$ , блока ПГУ в целом. Все это определяет необходимость решения задачи оптимизации термодинамических параметров и технических решений в условиях неопределенности.

В основу учета неопределенности информации о рассчитанных значениях интенсивностей отказов КУ  $\lambda$  положено следующее. Рассчитанные значения коэффициентов готовности  $K_G$ , зависящие от интенсивности отказа трубного пучка  $\lambda$ , представляются случайной величиной, распределенной по нормальному закону с параметрами  $M_{K_0}$  и  $S_0$ , дифференциальная функция которой запишется как  $p(\kappa/M_{K_0}, S_0)$ . Здесь  $M_{K_0}$  есть математическое ожидание показателя надежности ПГУ (например, значение коэффициента готовности блока  $K_G$ ), а  $S_0^2$  – дисперсия случайной величины  $\kappa$ . Для плотности вероятности  $p(\kappa/M_{K_0}, S_0)$  справедливы соотношения

$$\int p(\kappa/M_{K_0}, S_0) d\kappa = 1; \int p(\kappa/M_{K_0}, S_0) \kappa d\kappa = M_{K_0}; \int p(\kappa/M_{K_0}, S_0) (\kappa - M_{K_0})^2 d\kappa = S_0^2. \quad (2)$$

Если критерий эффективности выбора оптимальных параметров и технических решений, например чистого дисконтированного дохода (ЧДД), представить в виде  $R(x, \kappa)$ , где каждое значение  $\kappa$  реализуется с вероятностью  $p(\kappa/M_{K_0}, S_0)$ , то ожидаемое значение критерия эффективности  $\bar{R}(x, \kappa)$  определится как

$$\bar{R}(x, \kappa) = \int R(x, \kappa) p(\kappa / M_{\kappa_0}, S_0) d\kappa, \quad (3)$$

где  $x$  – оптимизируемый термодинамический параметр рабочего тела или техническое (схемное) решение.

Пусть «истинное» значение показателя надежности  $\kappa_I$ , полученное по результатам эксплуатации ПГУ, также является случайной величиной, плотность вероятности которой запишется в виде  $p(\kappa / M_{\kappa_I}, S_I)$ . При этом следует отметить, что эта функция обладает свойствами аналогичными (2). Кроме того, истинное значение величины  $\kappa_I$  может быть как больше, так и меньше расчетного значения  $\kappa_0$ , однако априори информативность значения  $\kappa_I$ , полученного по результатам эксплуатации, существенно выше, чем для расчетного  $\kappa_0$ , т.е.  $S_I$  значительно меньше  $S_0$ . Информативность значений  $\kappa_0$  и  $\kappa_I$  оценивается коэффициентом вариации  $\nu$ , определяемого как отношение [4]

$$\nu = S / M_{\kappa}. \quad (4)$$

Значения  $M_{\kappa_I}$  и  $S_I$  можно оценить, пользуясь плотностью вероятности получения  $\kappa_I$  в виде  $p(M_{\kappa_I} / M_{\kappa_0}, S_0, S_I)$ . Для приведенных плотностей вероятностей справедливо равенство:

$$p(\kappa / M_{\kappa_0}, S_0) = \int p(\kappa / M_{\kappa_0}, S_0) \cdot p(M_{\kappa_I} / M_{\kappa_0}, S_0, S_I) dM_{\kappa_I}. \quad (5)$$

Тогда по аналогии с (3) ожидаемое значение критерия эффективности  $R(x, \kappa)$  при истинных значениях  $M_{\kappa_I}$  и  $S_I$  запишется в виде:

$$\bar{R}_1(x, \kappa) = \int p(M_{\kappa_I} / M_{\kappa_0}, S_0, S_I) dM_{\kappa_I} \cdot \int R(x, \kappa) p(\kappa / M_{\kappa_I}, S_I) d\kappa. \quad (6)$$

Из (3) и (6) следует, что значения оптимальных параметров и технических решений, определенных по максимуму критериев  $\bar{R}(x, \kappa)$  и  $\bar{R}_1(x, \kappa)$ , различны. Кроме того, для расчетных значений  $\kappa_0$  и истинных значений  $\kappa_I$  величины ожидаемых значений  $\bar{R}(x, \kappa)$  и  $\bar{R}_1(x, \kappa)$  также различны.

Для определения влияния неопределенности информации о показателях надежности КУ на изменение оптимальных параметров и технических решений разложим целевую функцию вблизи экстремума, определенного при математическом ожидании показателя надежности  $M_{\kappa_0}$ , в ряд и ограничимся квадратными членами разложения:

$$R(x, \kappa) = R'_K(x, \kappa)(\kappa - M_{\kappa_0}) + 0,5R''_K(x, \kappa)(\kappa - M_{\kappa_0})^2 + R'_X(x, \kappa)(x - x_0^{opt}) + 0,5R''_X(x, \kappa)(x - x_0^{opt})^2 + R'_{KX}(x, \kappa)(\kappa - M_{\kappa_0})(x - x_0^{opt}), \quad (7)$$

где  $R'_K(x, \kappa)$  и  $R''_K(x, \kappa)$  — первая и вторая производные критерия эффективности по  $\kappa$ ;  $R'_X(x, \kappa)$  и  $R''_X(x, \kappa)$  — первая и вторая производные критерия эффективности по  $x$ ;  $R'_{KX}(x, \kappa)$  — производная критерия эффективности по  $\kappa$  и  $x$ .

Интегрируя выражение (7) с учетом плотности вероятности  $p(\kappa / M_{\kappa_0}, S_0)$ , получим:

$$\bar{R}(x, \kappa) = 0,5R''_K(x, \kappa)S_0^2 + R'_X(x, \kappa)(x - x_0^{opt}) + 0,5R''_X(x, \kappa)(x - x_0^{opt})^2. \quad (8)$$

Максимум критерия эффективности  $R(x, \kappa)$  соответствует  $x = x_0^{opt}$ , тогда:

$$\max \bar{R}(x, \kappa) = 0,5R''_K(x, \kappa)S_0^2. \quad (9)$$

Интегрируя выражение (7) с учетом плотности вероятности  $p(\kappa/M_{K1}, S_1)$  и принимая во внимание соотношение (3) и (6), получим:

$$\begin{aligned} \bar{R}_1(x, \kappa) = & R'_K(x, \kappa)(\kappa - M_{K0}) + 0,5R''_K(x, \kappa)[(\kappa - M_{K0})^2 + S_1^2] + R'_X(x, \kappa)(x - x_0^{opt}) + \\ & + 0,5R''_X(x, \kappa)(x - x_0^{opt})^2 + R'_{KX}(x, \kappa)(\kappa - M_{K0})(x - x_0^{opt}). \end{aligned} \quad (10)$$

Оптимальное значение  $x$  при истинных значениях показателя надежности  $\kappa$  с учетом (6) и (10) определится как:

$$x_1^{opt} = \frac{R''_X(x, \kappa)x_0^{opt} - R'_{KX}(x, \kappa)(\kappa - M_{K0}) - R'_X(x, \kappa)}{R''_X(x, \kappa)}. \quad (11)$$

Максимум критерия эффективности при истинных значениях показателя надежности  $\kappa$  определится как:

$$\max \bar{R}_1(x, \kappa) = 0,5R''_K(x, \kappa)S_0^2 - \frac{R''_{KX}(x, \kappa)}{R''_X(x, \kappa)} \Delta S^2, \quad (12)$$

где  $\Delta S^2 = S_0^2 - S_1^2$ , — разность дисперсий случайных величин значений расчетных и «истинных» показателей надежности  $\kappa$ , и  $\Delta S^2$  является мерой повышения информативности о неопределенности информации о показателях надежности.

Из (9), (11) и (12) следует, что степень изменения оптимизируемого параметра  $x$  в зависимости от изменения показателя надежности определится как:

$$\Delta x^{opt} = x_0^{opt} - x_1^{opt} = (M_{K1} - M_{K0}) \frac{R'_{KX}(x, \kappa)}{R''_X(x, \kappa)}, \quad (13)$$

а разность максимальных значений критериев эффективности составит:

$$\Delta \bar{R}(x, \kappa) = \max \bar{R}(x, \kappa) - \max \bar{R}_1(x, \kappa) = \frac{R''_{KX}(x, \kappa)}{R''_X(x, \kappa)} \Delta S^2 = \frac{R'_{KX}(x, \kappa) \cdot \Delta x^{opt}}{(M_{K1} - M_{K0})} \Delta S^2. \quad (14)$$

Анализ (14) показывает, что если решается задача только учета неопределенности информации о значениях показателей надежности при оптимальных параметрах или технических решениях, то величина  $\Delta \bar{R}(x, \kappa)$  зависит от величины и знака  $(M_{K1} - M_{K0})$  и значения  $\Delta S^2$ . Принимая во внимание то обстоятельство, что истинное значение  $\kappa_1$  более информативно, чем  $\kappa_0$ , т.е.  $\Delta S^2$  больше нуля, то знак величины  $\Delta \bar{R}(x, \kappa)$  определяется знаком  $(M_{K1} - M_{K0})$ .

Таким образом, величина  $\Delta\bar{R}(x, \kappa)$  зависит как от значений  $(M_{\kappa 1} - M_{\kappa 0})$ , так и от изменения информативности «истинных» и расчетных значений показателей надежности, которая определяется значениями коэффициентов вариации.

### Расчетно-теоретические исследования

Разработанные методические положения учета неопределенности информации о показателях надежности КУ ПГУ использованы для оценки устойчивости оптимальных решений при определении сравнительной эффективности отопительных ПГУ, выполненных по схемам с одноконтурным, двухконтурным и трехконтурным котлами-утилизаторами электрической мощностью 110 МВт. Сравнительный анализ эффективности проведен для схем бинарных ПГУ, отличающихся числом уровней давлений генерируемого в КУ пара и выполненных на базе ГТУ типа PG6111FA фирмы General Electric мощностью 77 МВт со следующими характеристиками: степень повышения давления в компрессоре 15,8, расход воздуха через компрессор 203,3 кг/с, температура продуктов сгорания после турбины 600°C. В качестве паровой принята турбина типа Т- 25/33-7,6/0,12 ОАО «Калужский турбинный завод» с параметрами свежего пара высокого давления 8,6 МПа и 535 °С. В основу расчета конструктивных характеристик КУ положен разработанный и зарегистрированный программный комплекс [5]. В таблице 1 представлены результаты расчетов энергетических характеристик отопительной ПГУ при различных температурах наружного воздуха. При этом тепловая мощность ПГУ при расчетной температуре наружного воздуха составляет 89,5 МВт.

Таблица 1

Энергетические характеристики отопительной ПГУ, выполненной по различным схемам

Наим.	Температура наружного воздуха	Мощность ГТУ	Мощность ПГУ	Тепловая мощность газовойодяного подогревателя	Тепловая мощность отборов пара
	(°С)	(МВт)	(МВт)	(МВт)	(Гкал/ч)
Одноконтурный КУ	+30	66,70	27,08	5,97	21,58
	+15	77,42	25,59	6,45	21,59
	-1,8	85,97	22,03	6,88	70,50
	-26	89,18	19,33	7,83	70,80
Двухконтурный КУ	+30	66,70	31,24	5,97	21,58
	+15	77,42	31,42	6,45	21,59
	-1,8	85,97	22,90	6,88	70,50
	-26	89,18	19,79	7,83	70,80
Трехконтурный КУ	+30	66,70	31,29	5,97	21,58
	+15	77,42	33,55	6,45	21,59
	-1,8	85,97	25,28	6,88	70,50
	-26	89,18	22,11	7,83	70,80

Полученные показатели энергетической эффективности использованы для расчета величины ЧДД сравниваемых вариантов отопительной ПГУ, которые приведены в таблице 2. Из таблицы следует, что наиболее эффективной является схема ПГУ с трехконтурным КУ.

Таблица 2

Показатели эффективности ПГУ, выполненных по различным схемам

Наименование	Обознач.	Ед.изм.	I давления	II давления	III давления
Мощность ПГУ	$N_{\text{ПГУ}}$	МВт	103,02	108,84	110,6
Электрический КПД ПГУ	$\eta_{\text{ПГУ}}$	-	0,4711	0,4977	0,5074
Коэффициент готовности ПГУ	$K_{\text{Г}}$	-	0,9758	0,9629	0,9493
Чистый дисконтированный доход	ЧДД	млн руб.	1956,2	2156,7	2849,4
Изменение ЧДД	$\Delta\text{ЧДД}$	млн руб.	273,10	193,40	0,0000

С использованием разработанной методики с учетом (14) проведено исследование влияния неопределенности и информативности исходной информации о значениях коэффициента интенсивности отказа КУ на сравнительную эффективность различных схем ПГУ. Результаты расчетов представлены на рисунке 1.

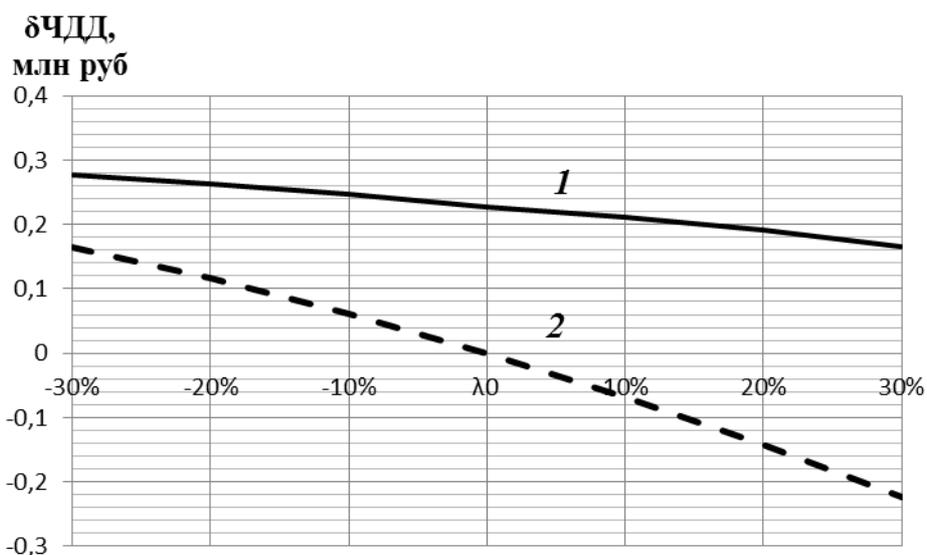


Рис. 1. Влияние неопределенности и информативности показателя безотказности КУ ПГУ на изменение величины ЧДД: 1- величина информативности «истинного» значения коэффициента безотказности  $\nu_1 = 0,5 \nu_0$ ; 2- величина информативности «истинного» значения коэффициента безотказности  $\nu_1 = \nu_0$ .

Из рисунка 1 следует, что повышение информативности «истинного» значения коэффициента интенсивности отказа КУ приводит к повышению ожидаемого значения величины ЧДД. Кроме того, отклонение «истинного» значения интенсивности отказа на 20% приводит к изменению ЧДД на 0,1-0,5 млн руб. Приведенные значения влияния неопределенности информации о расчетных значениях интенсивности отказа КУ

существенно ниже значений изменения величины ЧДД при переходе от схемы с трехконтурным КУ к схеме с двухконтурным КУ. Это свидетельствует об устойчивости вывода об экономической эффективности схемы ПГУ с трехконтурным КУ.

### **Заключение**

1. Разработана вероятностная методика учета неопределенности информации о единичных и комплексных показателях надежности энергетического оборудования парогазовых установок на выбор рациональных схемно-параметрических решений.
2. Установлено, что повышение информативности «истинных» показателей надежности приводит к повышению эффективности принятых оптимальных технических решений. Отклонение «истинных» значений показателей надежности ПГУ в сторону отрицательных значений приводит к снижению численных значений критерия эффективности.
3. Неопределенность и информативность расчетных значений интенсивности отказов не оказывают влияния на вывод об экономической эффективности ПГУ с трехконтурным котлом-утилизатором.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по НИР № 1579 в рамках государственного задания*

### **Список литературы**

1. Ларин Е.А. Методы и модели расчета и обеспечения надежности комбинированных теплоэнергетических установок и систем /Вестник Саратовского государственного технического университета. №3(4) — 2004 — С. 44-57.
2. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. — М.: Высшая школа, — 1984. 256 с.
3. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: Учеб. пособие для теплоэнергетических и энергомашиностроительных вузов /Г.П. Гладышев, Р.З. Аминов, В.З. Гуревич и др. // Под ред. А.И. Андрущенко. — М.: Высш. шк. 1991. — 303 с.
4. Теория вероятностей: Учеб. для вузов/Е.С. Вентцель. – 10-е изд., стер. – М.: Высш.шк., 2006. — 575 с.: ил.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660962. Расчет и выбор котла-утилизатора газотрубного/ Долотовский И.В., Анкудинова М.С.- Заявка № 2014617519; Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 20.10.2014

**Рецензенты:**

Хрусталеv В.А., д.т.н., профессор кафедры «Тепловые и атомные электрические станции»  
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина  
Ю.А.», г. Саратов;

Семенов Б.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплотехника»  
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина  
Ю.А.», г. Саратов.