

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТОПЛИВА В ФОРСУНОЧНЫХ МОДУЛЯХ С ТРЕХЪЯРУСНЫМ ЗАВИХРИТЕЛЕМ

© 2007 В. В. Третьяков

Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, г. Москва

Работа посвящена исследованию фронтального устройства с трехъярусным завихрителем для малоэмиссионной камеры сгорания. Проведено сравнение распределений топлива в трех конструктивных вариантах модуля. В результате расчетов найдены степени осаждения топливных капель на стенки модуля. Рассчитаны поля концентраций топлива.

Введение

Предметом настоящего исследования является распределение топлива в форсуночном модуле МОГОС. Цель исследования, которое является продолжением работы [1], - выявление влияния на процессы смесеобразования различных изменений конструкции модуля. Эксперименты, в том числе огневые испытания, показали, что основная проблема настоящего этапа – попадание капельножидкого топлива на стенки и лопатки тангенциального завихрителя, приводящие к местным перегревам, а в некоторых случаях и к обгоранию, элементов конструкции. Для решения этой проблемы предложены несколько модификаций модуля. Схема первого варианта конструкции модуля приведена на рис. 1.

Рассматриваются следующие изменения во внешнем контуре завихрителя: а) изменение конструкции кольцевого стабилизатора, б) установка пластины-перегородки на выходе из лопаточного канала завихрителя, в) изменение площади проходного сечения выходного сопла завихрителя, г) установка распыливающей пластины вблизи пневматических форсунок. Внутренний контур (центральный и осевой завихрители) оставлены без изменения.

Настоящее исследование носит расчетный характер. При этом принимаются следующие упрощающие предположения. При расчете движения воздуха течение считается изотермическим и осесимметричным. При расчете движения, нагрева и испарения капель пренебрегается влиянием этих процес-

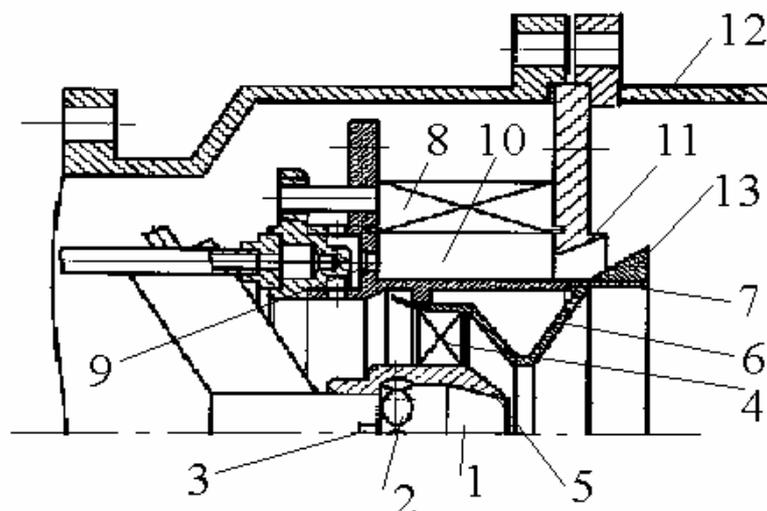


Рис. 1. Схема МОГОС. Вариант № 1

1-камера смешения центрального завихрителя, 2-завихрительное устройство, 3-центробежная форсунка, 4-осевой завихритель, 5-разделитель, 6-стенка модуля, 7-разделяющая обечайка, 8-тангенциальный завихритель, 9-пневматическая форсунка, 10-камера смешения наружного завихрителя, 11-козырек, 12-стенка модуля, 13-стабилизатор

сов на характеристики газового потока. При расчете распределения паровой топливной фазы в рабочем объеме модуля топливный пар рассматривается как пассивная примесь. Считается также, что на стенках модуля испарения топливных капель не происходит.

Методика расчета

Принятая в работе методика расчета объединяет в себе модель расчета турбулентных закрученных течений, модель каскадного распыливания топлива, модели движения, нагрева и испарения капель топлива и модель движения топливных паров [1].

Расчеты течения газовых фаз основываются на численном интегрировании полной системы уравнений Рейнольдса в рамках двухпараметрической модели турбулентности ($k-\epsilon$). Сведения о процедуре расчета и конечно-разностном итерационном методе можно найти в [1-3]. Предполагается, что воздушные потоки на входе имеют равномерные профили. На твердых границах ставятся условия «закона стенки». В выходном сечении - условие установившегося течения, на оси модуля – условие симметрии. Описанная методика предварительно была апробирована на расчете истечения воздуха в безграничное пространство. Получено согласование результатов расчетов с данными опытов [4].

Расчеты распределения топлива основаны на решении системы уравнений движения, нагрева и испарения отдельных капель, записанных в переменных Лагранжа [5]. Влиянием турбулентных пульсаций на движение капель и изменением формы капель в процессе их движения пренебрегалось. При моделировании распыла топлива полагалось, что топливный факел имеет полидисперсную структуру с распределением капель по размерам по закону Розина - Раммлера с показа-

телем $n = 3$ [6]. Распределение капель по углам принималось нормальным. Рабочей жидкостью считался керосин ТС-1 (плотность $\rho_{жс} = 840 \text{ кг/м}^3$).

Результаты расчета течения

При расчетах полей скорости и давления считалось, что во входных сечениях модуля профили всех зависимых переменных являются равномерными. За характерный размер выбран $H_0 = 40 \text{ мм}$, за характерную скорость – $U_0 = 20 \text{ м/с}$. К этим величинам отнесены все линейные размеры и скорости. Например, $u_j^0 = U_j^0 / U_0$ – безразмерная тангенциальная компонента скорости на выходе из лопаток завихрителя. Рассмотрены следующие три варианта модуля. Первый вариант – исходный (рис. 1) характеризуется длиной лопаток тангенциального завихрителя $H = 30 \text{ мм}$. Во втором варианте использована модифицированная конструкция кольцевого стабилизатора и уменьшена эффективная длина лопаток тангенциального завихрителя ($H = 14 \text{ мм}$) за счет установки пластины-перегородки. Третий вариант – установка пластины-перегородки на выходе из лопаточного канала ($H = 14 \text{ мм}$) и установка в камере смешения тангенциального завихрителя распыливающей пластины, под которую подается охлаждающий воздух. В этом случае конфигурация кольцевого стабилизатора соответствует варианту № 1. Предполагается, что воздушные потоки входят внутрь модуля по нормали к соответствующим границам, и что углы закрутки потоков во входных сечениях равны углам подачи струй или углам установки лопаток завихрителей. Значения компонента скорости на входе в модуль, u_x^0 , u_r^0 и u_j^0 , приняты в соответствии с табл. 1, где x , r и j – продольная, радиальная и тангенциальная координаты, а индексы 1, 2 и 3 относятся к

Таблица 1

№ варианта	u_{r1}^0	$u_{\phi1}^0$	u_{x2}^0	$u_{\phi2}^0$	u_{r3}^0	$u_{\phi3}^0$
1	-0,15	0,35	0,47	0,81	-0,48	1,32
2	-0,14	0,32	0,42	0,74	-0,92	1,61
3	-1,10	2,61	0,48	0,83	-0,68	1,18

центральному, осевому и тангенциальному завихрителям.

На рис. 2 и 3 представлены векторные поля скорости в продольном сечении модуля для вариантов № 2 и 3, соответственно. Результаты расчетов газодинамического поля для варианта №1 оказались близкими к варианту №2.

Из рассмотрения газодинамических полей видно, что они отличаются, прежде всего, видами течения в приосевой области. Так, в вариантах № 1 и 2 имеется развитая приосевая зона обратного тока (ЗОТ), которая смыкается с ЗОТ за стабилизатором. В варианте № 3 ЗОТ в приосевой области отсутствует. Эти различия в газодинамических полях связаны с изменениями в проходных сечениях завихрительных устройств и с различиями в расходах воздуха по контурам.

Попадание топливных капель на стенки тангенциального завихрителя

При расчетах распределения топлива в рабочем объеме модуля и попадания капель на его стенки задание начальных условий для топливных капель производилось в соответствии с теорией форсунок [6] и использованием экспериментальных данных [7]. Так, среднезауэровские диаметры капель приняты равными 50 мкм. Предполагалось, что топливные капли, попадающие на стенки, образуют на них жидкие пленки, которые под действием воздушного потока смещаются в направлении острых кромок модуля, где и происходит их вторичный распыл. Данные по характеристикам вторичного распыла взяты из работы [7].

В табл. 2 сведены данные по попаданию капель наружного контура на стенки модуля

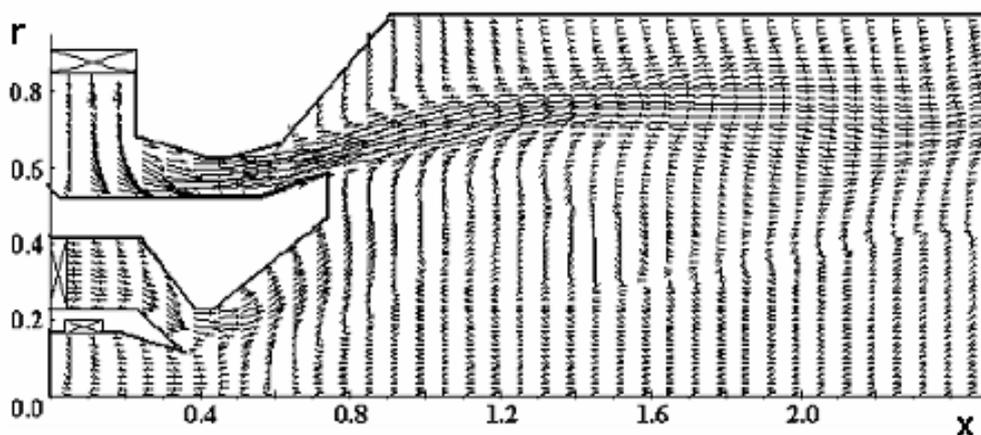


Рис. 2. Расчетное векторное поле скорости в продольном сечении модуля. Вариант № 2

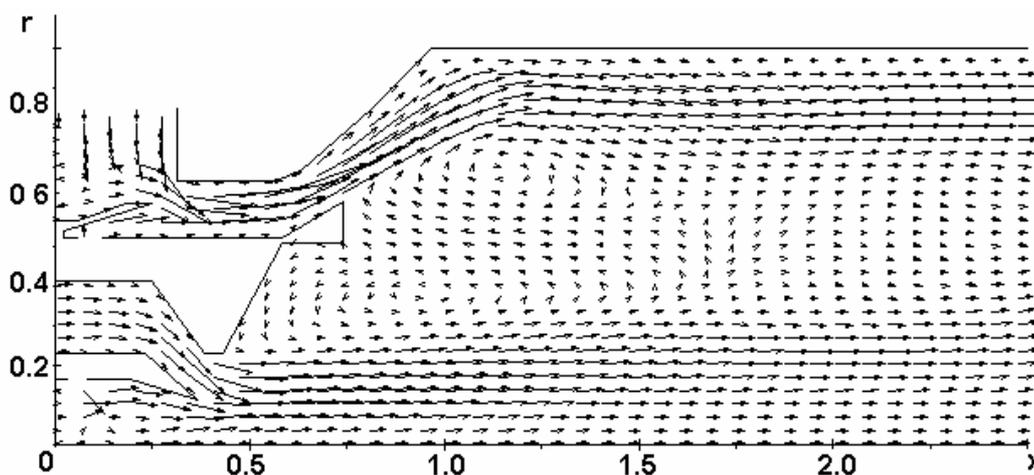


Рис. 3. Расчетное векторное поле скорости в продольном сечении модуля. Вариант № 3

Таблица 2

№ варианта	$G_{ВЫХ}$, г/с	$G_{СТАБ}$, г/с	$G_{КОЗ}$, г/с	G_w , г/с
1	0,12	2,82	0,19	0,27
2	0,0	2,39	0,12	0,89
3	0,5	0,03	0,04	2,9

для трех вариантов расчетов при первичном распыле. Здесь $G_{ВЫХ}$, $G_{СТАБ}$, $G_{КОЗ}$ и G_w – масса топлива, попадающая в единицу времени, соответственно, на выход из модуля, на стенку стабилизатора, на козырек и на стенку жаровой трубы; $G_T = 3,4$ г/с – расход топлива через форсунку; расход топлива через внутренний контур составлял 1,8 г/с. Отметим, что в соответствии с условиями работы модуля попадание топлива на вход и лопатки завихрителя совершенно недопустимо, а их попадание на козырек, обечайку и стабилизатор может привести при наличии горения к образованию местных зон перегрева стенок и наработки NO_x . Из табл. 2 видно, что в варианте № 1 доля осаждающегося на стенки козырька топлива составляет приблизительно 6-8 %, а при установке пластины-перегородки (уменьшении эффективной длины лопаток завихрителя) и изменении конфигурации стабилизатора (вариант № 2) эта доля снижается до 3 %. В варианте № 3 осаждение топлива на стенки козырька составляет около 1 %. При этом практически все топливо, распыленное пневматическими форсунками, попадает на распыливающую пластину, $G_{ПЛАСТ} = 3,1$ г/с. Таким образом, доля топлива, попадающая на стенку козырька, в результате проведенных конструктивных мероприятий последовательно уменьшается. Это связано главным образом с увеличением скорости воздушных потоков внутри камеры смешения тангенциального завихрителя. Из табл. 2 также следует, что основная доля распыленного топлива в вариантах № 1 и 2 попадает на разделяющую обечайку и стабилизатор и составляет от 70 до 90 %, в то время как в варианте № 3, вследствие экранирующего действия распыливающей пластины и дополнительной подачи обдувающего ее воздуха, осаждение капель на разделяющую обе-

чайку практически отсутствует. Отметим, что во всех рассмотренных вариантах конструкции имеет место весьма высокий уровень осаждения капель топлива на стенки жаровой трубы. Так, согласно табл. 2, массовая доля капельно-жидкого топлива, попадающего на стенку жаровой трубы, в варианте № 1 составляет 75 %, в варианте № 2 – 98 % и в варианте № 3 – 85 %. Это связано, во-первых, с отклонением воздушных потоков стабилизаторами и, во-вторых, с большими величинами закруток потоков, вытекающих из завихрителей.

Распределение топлива по объему модуля

При расчетах распределений топлива данные о начальных скоростях и углах вылета капель брались из результатов автономных испытаний центробежной и пневматических форсунок. Результаты этих расчетов в виде изолиний безразмерных концентраций капельно-жидкого топлива, осредненных по углу j , представлены на рис. 4 и 5 для второго и третьего вариантов расчетов. Здесь обезразмеривание концентраций проведено на величину r_0 – плотность воздуха.

Из рисунков видно, что капельно-жидкое топливо интенсивно сносится закрученными воздушными потоками в радиальном направлении. При этом происходит заметное расширение топливного факела и, как следствие, уменьшение концентрации топлива в его ядре. Так, распределения капельно-жидкого топлива в рабочем объеме модуля показывают, что топливный факел в варианте № 3 шире, чем в вариантах № 1 и 2. Это приводит к различиям в уровнях концентраций топлива, причем самый низкий уровень соответствует варианту № 3. В этом случае радиальное распределение концентраций топлива является более равномерным.

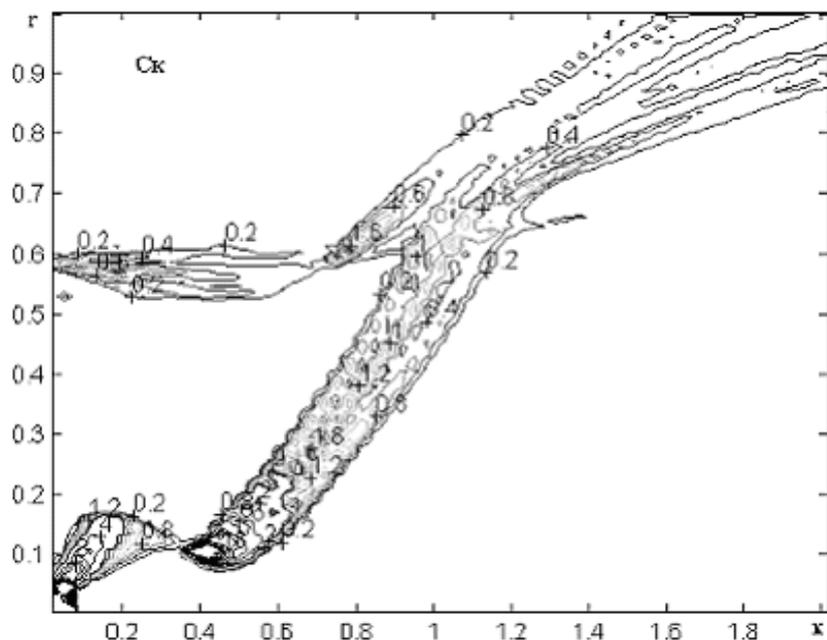


Рис. 4. Изолинии концентраций капель в продольном сечении модуля. Вариант № 2

Приведенные графики соответствуют режиму холодных испытаний. На рис. 6 в качестве примера представлены распределения концентраций топливных паров для режима малого газа для варианта № 3.

Роль элементов конструкции модуля в образовании топливо-воздушной смеси

Установлено, что уменьшение закрутки в тангенциальном завихрителе приводит к существенному снижению сепарации капель на его стенки, в некоторых режимах более,

чем на порядок. В данном случае, во всех вариантах расчетов режим течения соответствовал закрутке потока на 60° в тангенциальном завихрителе, при которой доля капель, попадающая на стенки козырька, невелика - менее 6 %. Установка перегородки или, что то же самое, уменьшение длины лопаток тангенциального завихрителя, приводит к увеличению скорости течения воздуха в камере смешения и, как следствие, к уменьшению доли капель, попадающих на стенки козырь-

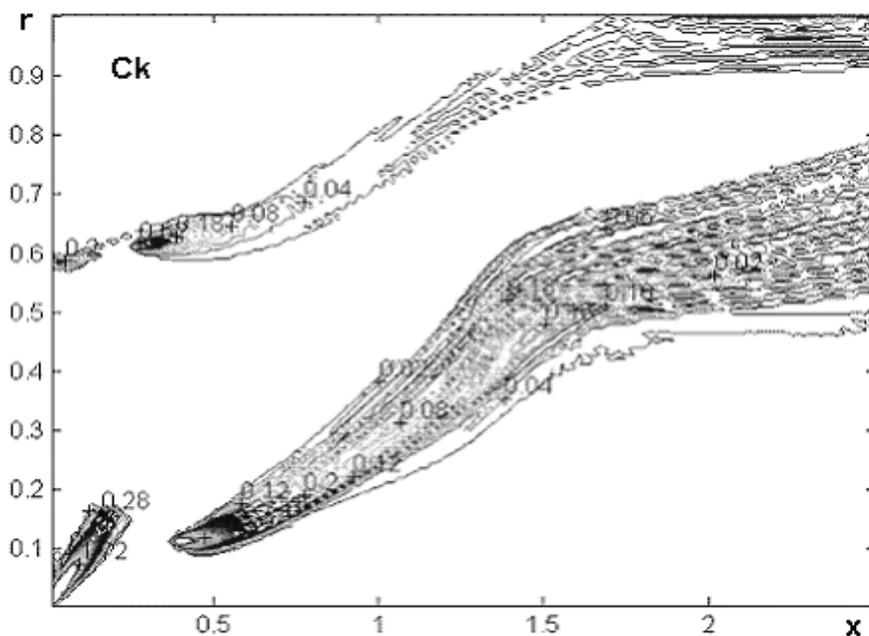


Рис. 5. Изолинии концентраций капель в продольном сечении модуля. Вариант № 3

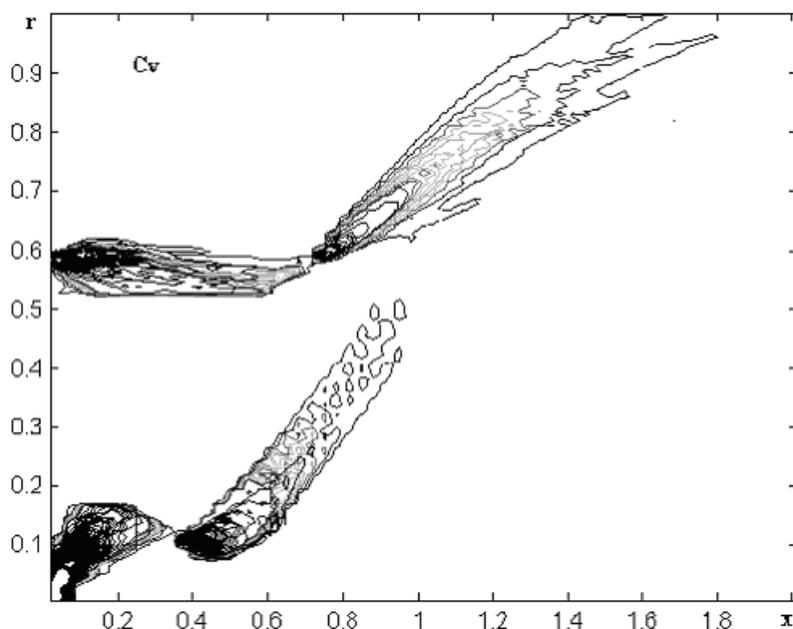


Рис. 6. Профили безразмерных концентраций пара в продольном сечении модуля.
Режим малого газа. Вариант № 4

ка. Эта пластина-перегородка играет двойную роль. С одной стороны, в результате ее установки уменьшается доля топлива, попадающая на вход тангенциального завихрителя, топливо ближе подходит к стабилизатору пламени, происходит захват капель возвратно-циркуляционным течением в следе за стабилизатором. С другой стороны, уменьшается концентрация подаваемого пневматическими форсунками топлива в область стабилизатора. Изменение конфигурации стабилизатора практически ничего не изменяет в распределениях капель внутри завихрителя, но существенным образом влияет на гидродинамику течения в камере, в частности, на структуру зон обратных токов, а, следовательно, на осаждение капель на стенки жаровой трубы и распределение топлива по ее объему. Роль распыливающей пластины в образовании топливо-воздушной смеси состоит в создании более однородного окружного распределения топлива и в предотвращении его оседания на стенки завихрителя. Так как распыливающая пластина представляет собой дополнительное загромождение потока, то она способствует формированию внутри завихрителя высокоскоростного потока, что и предотвращает попадание капель на стенки завихрителя. Отметим, что в варианте № 3 топливный факел оказывается более широ-

ким, чем в двух других вариантах, но при этом он дальше отстоит от стабилизатора. Это объясняется интенсивным осевым движением газового потока, связанным с отсутствием приосевой зоны обратного тока.

Заключение

Представленные в настоящей работе данные показывают, что проведенные изменения конструкции модуля от первого к третьему варианту в целом положительно повлияли на характеристики сепарации капель внутри завихрительного устройства. В результате расчетов установлено влияние основных конструктивных параметров на характеристики течения и распределения топлива в трехъярусном модуле камеры сгорания. Найдены места попадания капель на стенки модуля, которые являются областями возможных прогаров стенок. Во всех рассмотренных вариантах конструкции отмечено весьма существенное попадание капель на стенки модуля. В третьем варианте конструкции топливный факел вспомогательного топлива не попадает в область за кольцевым стабилизатором, что может отрицательно сказаться на характеристиках запуска модуля и устойчивости процесса горения.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 07-08-00573.

Список литературы

1. Третьяков В. В.. Расчет распределения капельно-жидкого и парообразного топлива в трехъярусном модуле камеры сгорания // Вестник СГАУ. – 2006. - №2. - ч. 2. - С.136-141.
2. Лебедев А. Б., Третьяков В. В. Методы расчета распределения топлива в камерах сгорания // Труды ЦИАМ. - Обзор № 355. – 1992. – 138 с.
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с.
4. Krasheninnikov S. Yu, Mironov A. K., Tretiyakov V. V. Computational-Experimental Investigation of Flow in the Sprayer Module of a Combustion Chamber of TAPS Circuit Design // J. Heat Transfer Research. 2006, v.37, №6, p. 501-513.
5. Отрывные течения в камерах сгорания / Сборник под ред. Ягодкина В. И. // Труды ЦИАМ №1203. - 1987 г. – 138 с.
6. Дитякин Ю. Ф. и др. Распыливание жидкостей. - М., Машиностроение, 1977. – 208 с.
7. Васильев А. Ю. и др. Исследования двухфазных потоков методом регистрации флуоресценции капель жидкости // Труды IX Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков». - М.: Изд.дом МЭИ, 2007. - С. 60-63.