

УДК 532.525.5:537.2:621.45

© 2002 г. А.Б. ВАТАЖИН, Д.А. ГОЛЕНЦОВ, В.А. ЛИХТЕР,
Л.И. СМИРНОВ**ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ ВЫНОСА
ИЗ РЕАКТИВНОГО АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Проведено экспериментальное моделирование возникновения электрического тока, выносимого из авиационного реактивного двигателя его струей, и тока, стекающего в газодинамический след за нагретой лопаткой. В экспериментах использовались две модели: металлический цилиндрический канал, внутри которого движется высокотемпературный газ, и металлическая лопатка (от лопаточной машины), обтекаемая высокотемпературной струей. Рабочая среда создавалась на газогорельной установке, в которой происходило диффузионное горение струи пропана в спутном потоке воздуха. Представлены зависимости электрического тока выноса от расхода воздуха в спутном потоке. Дано качественное объяснение полученных результатов.

Работа авиационных реактивных двигателей сопровождается выносом из них реактивной струей электрического тока (тока выноса J) [1, 2]. Этот ток, как показано в натурных исследованиях, в большинстве случаев является положительным. Наличие такого тока могло бы приводить к непрерывному накоплению на летательном аппарате отрицательного электрического заряда. Однако на всех самолетах устанавливаются разрядники (работающие по принципу коронного разряда), которые сбрасывают в окружающее пространство отрицательный ток, в стационарных условиях по модулю равный току J . На самолете в этих условиях имеется некоторый отрицательный заряд, необходимый для коронирования разрядников. С повышением качества разрядников стационарный заряд на самолете уменьшается.

Ток выноса связан с наличием в двигательной струе заряженных частиц (ионов, электронов, частиц несгоревшего топлива). В предположении, что заряженные частицы в выходном сечении двигателя "вморожены" в газодинамический поток, ток выноса определяется формулой

$$J = \int_{\Sigma} qv_n d\Sigma$$

где q – плотность объемного электрического заряда, v_n – проекция вектора скорости газа на нормаль к выходному сечению двигателя Σ . Для выполнения условия $J \neq 0$ необходимо, чтобы в потоке существовали области с $q \neq 0$, т.е. чтобы поток не был электрически квазинейтральным. (Если бы различные сорта заряженных частиц двигались с различными скоростями, то условие $J \neq 0$ могло бы выполняться и при квазинейтральности среды на срезе двигателя.)

Исследование причин нарушения квазинейтральности потока в тракте двигателя является достаточно сложной задачей. Одна из причин, обусловленная диффузионными электрическими процессами внутри тракта двигателя и исследуемая в [3–5], состоит в следующем. В камере сгорания авиационного двигателя, вследствие хемоионизационных процессов возникают электроны и ионы, которые далее движутся с газодинамическим потоком, первоначально являющимся квазинейтральным.

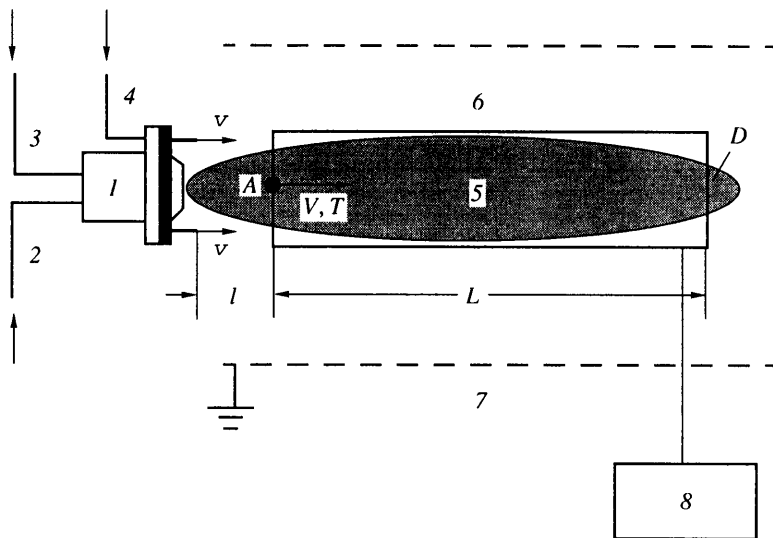
Диффузионные электрические процессы развиваются вблизи внутренних поверхностей (стенок канала, внутренних элементов двигателя), на которых концентрации заряженных частиц существенно меньше, чем в ядре потока. Так как коэффициент диффузии электронов намного больше, чем ионов, то диффузионный поток электронов превосходит ионный поток, и вблизи поверхности образуется избыточный положительный заряд, который сносится газодинамическим потоком, и тем самым возникает ток выноса. Этот процесс ограничивается развивающимся собственным электрическим полем. Физико-математическая модель этого процесса включает уравнения сохранения для заряженных частиц (с учетом их конвекции, диффузии и дрейфа в электрическом поле) и уравнение для электрического поля [3]. В рамках такого подхода проведено численное моделирование электрических диффузионных процессов на плоской пластине при ламинарном и турбулентном ее обтекании [3, 4], в окрестности критической точки затупленного тела [4] и на высокотемпературной турбинной лопатке [5].

Однако экспериментальные исследования указанного выше процесса нарушения квазинейтральности потока и возникновения тока выноса в настоящее время отсутствуют. Данная работа посвящена лабораторному моделированию генерации тока выноса в цилиндрическом канале, который моделирует внутренний тракт двигателя, и на лопатке (применительно к турбине двигателя). Рабочим газом являются продукты сгорания пропана в воздухе.

В этой связи заметим, что для определения параметров низкотемпературной плазмы продуктов сгорания часто используется зондовая методика, когда тело малых размеров (зонд) устанавливается в потоке и экспериментально находится вольт-амперная характеристика зонда. Теория зонда основана на анализе электрических диффузионных процессов вблизи его поверхности. Наиболее четкая теория зонда создана для случая, когда движение газа относительно зонда отсутствует. Учет реального обтекания зонда низкотемпературной плазмой до сих пор является не полностью решенной задачей. Зондовая методика и ее теоретическая интерпретация ранее разрабатывались во многих научных организациях.

1. Экспериментальная установка и модели. Схема установки показана на фиг. 1. Основным элементом является газовая горелка *1* с диаметром сопла 0.5 см и с регулируемым расходом топлива и воздуха, что позволяет создавать топливно-воздушную смесь с различными значениями коэффициента избытка воздуха. Топливо (пропан) и воздух подаются по магистралям *2* и *3* соответственно. Для предотвращения засорения горелки и попадания в поток посторонних частиц используется специальный фильтр (не показанный на фиг. 1). Для осуществления горизонтального движения продуктов сгорания (преодоления сил плавучести) используется система *4* создания спутного потока воздуха путем его поддува через четыре трубки, выходящие за срез сопла горелки на 1.5 см и равномерно расположенные в азимутальном направлении. Эта система позволяет дополнительно варьировать коэффициент избытка воздуха и полную сгорание и создавать пламя *5* от оранжевого цвета (с большим содержанием частиц сажи) до голубого (малое содержание сажи). При этом температура потока в точке *A* изменяется от 873 до 1373 К. Скорость потока и его температура измеряются с помощью трубки полного давления с хромель-алюмелевой термопарой. Система поддува дает также возможность проводить эксперименты на холодном воздушном потоке со скоростью до 60 м/с на срезе горелки.

Возможности созданной установки гораздо больше, чем непосредственно использованные в данной работе. Установка предназначена для проведения широкого круга электрогазодинамических исследований. Так, в ней предусмотрен ввод в холодный или горячий поток дополнительных заряженных или незаряженных частиц с помощью специальной системы подачи дисперсной фазы. Вне струи продуктов сгорания в нижней по потоку зоне установлена система зондов-антенн для регистрации пульсаций электрического поля, создаваемого заряженными частицами в газодинамическом потоке.



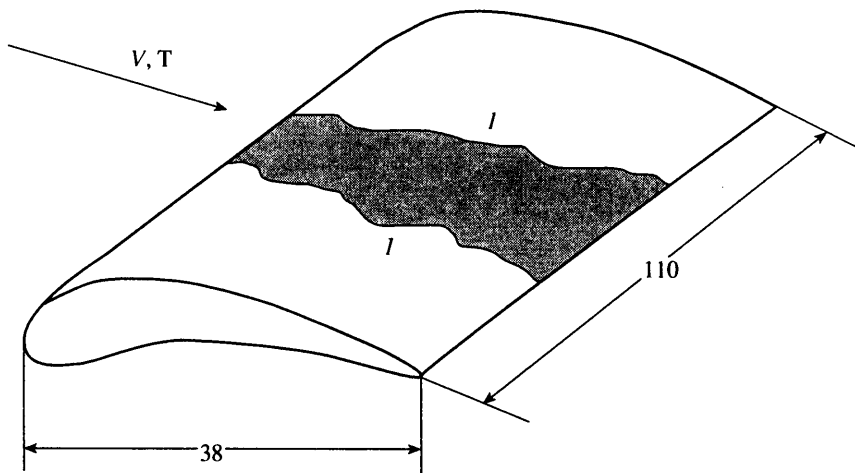
Фиг. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – газовая горелка, 2 – подача пропана, 3 – подача воздуха, 4 – система подачи спутного потока воздуха, 5 – пламя, 6 – экспериментальная модель (металлический цилиндр), 7 – экранирующая сетка, 8 – измерительный прибор. Точка А – место измерения температуры и скорости газа при отсутствии модели

В данной установке горелка 1 и системы подачи 2–4 электрически изолированы от земли. Для измерения возможного тока с указанных элементов они должны быть соединены с землей через прибор (например, микроамперметр).

Расходы топлива и воздуха через горелку составляли 14 и 18 см³/с соответственно и не изменялись в процессе описываемых ниже экспериментов. Расход воздуха через систему 4 поддува спутного воздуха изменялся от $G_a = 39$ до 160 см³/с. При дальнейшем увеличении G_a реализовался срывной режим. Путем изменения G_a создавались различные газодинамические и температурные условия обтекания устанавливаемых в потоке моделей.

В работе были использованы две экспериментальные модели. Первая представляет собой электрически изолированный от земли металлический цилиндр 6 диаметра D и длины L , установленный соосно со струей продуктов сгорания и отстоящий на расстоянии l от среза трубок системы подачи 4 спутного воздуха. Эксперименты проводились с цилиндрами следующих размеров: $L = 23.5$ и $D = 2.4$, $L = 19$ и $D = 4.6$; $L = 35$ и $D = 4.5$ см. Для определения тока, идущего из рабочего газа в цилиндр 6, последний соединялся с землей через прибор, а горелка 1 и системы подачи 2–4 соединялись с землей напрямую. Сигнал с цилиндра подавался на анализатор ONO SOKKI (8 на фиг. 1), и ток, идущий в цилиндр, определялся как $I = U/R$, где U – падение напряжения на входном сопротивлении анализатора $R = 10^6$ Ом. Для уменьшения внешних электрических помех (в основном на частоте 50 Гц) цилиндр экранировался заземленной сеткой 7, установка которой привела к снижению на порядок уровня фоновых помех.

Второй экспериментальной моделью была изолированная от земли стальная лопатка с размахом 11 см, хордой 3.8 см и максимальной толщиной 0.2 см. Лопатка устанавливалась горизонтально непосредственно в пламя, которое "покрывало" только часть лопатки по ее размаху (см. фиг. 2, линии l схематично показывают размер пламени). Расстояние l (см. фиг. 1) от среза трубок системы поддува воздуха до передней кромки лопатки составляло 5.5 см. Электрический ток, идущий из газа в лопатку, измерялся таким же способом, как на цилиндре.



Фиг. 2. Экспериментальная модель – лопатка: l – границы пламени на поверхности лопатки

2. Результаты экспериментов. Перед выполнением основных экспериментальных исследований были проведены следующие методические эксперименты.

Прежде всего была обеспечена высокая степень электрической изоляции от земли газогорельного источника и экспериментальных моделей. С особой тщательностью проверялась надежность изоляции концевых креплений лопатки. Сопротивление изоляции всех элементов было не ниже 10^9 Ом.

Измерения газодинамических и электрических параметров для каждой экспериментальной точки, характеризующейся заданными расходами топлива и воздуха и заданными геометрическими параметрами моделей, проводились после выхода всей системы на стационарный газодинамический и тепловой режимы.

При работающем газогорельном источнике (при наличии и отсутствии экспериментальных моделей) был измерен электрический ток, стекающий через прибор с источника на землю. Этот ток с высокой степенью точности оказался равен нулю. Это важное обстоятельство позволяет считать, что ток I , идущий из газа в экспериментальную модель, равен по модулю и противоположен по знаку току J , выносимому газом из цилиндра или стекающему в газодинамический след за лопаткой.

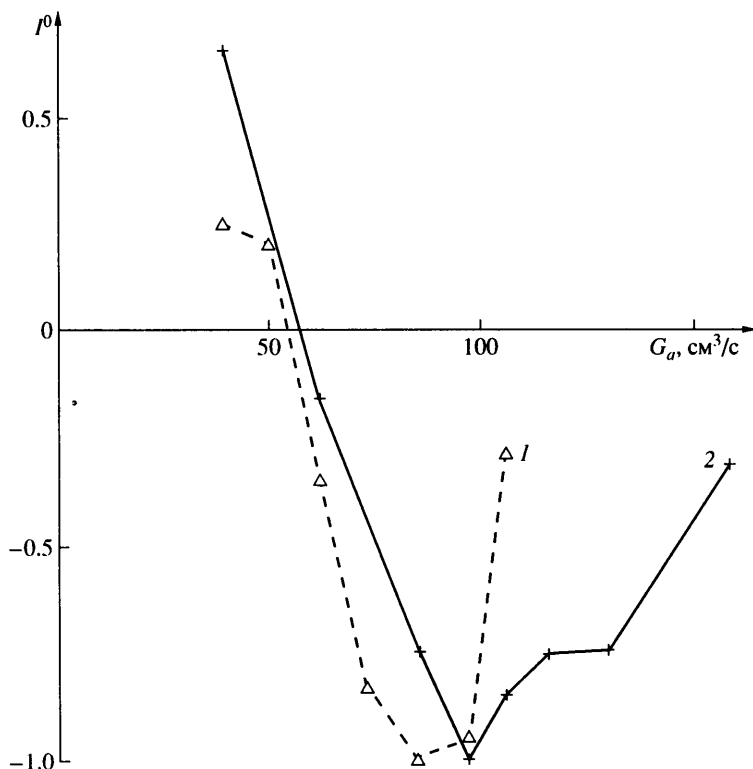
Существенно, что в "холодном" эксперименте, когда подается только холодный воздух, а расход топлива равен нулю, ток I на экспериментальные модели отсутствует.

Перед проведением электрических измерений были проведены измерения газодинамических параметров пламени в точке А (см. фиг. 1) при отсутствии экспериментальных моделей. Соответствующие результаты для $l = 0.5$ см представлены ниже

$G_a, \text{см}^3/\text{с}$	39	62	85	106
$T, \text{К}$	873	973	1073	1173
$V, \text{м/с}$	20	37	52	64

Отсюда следует, что при увеличении расхода поддуваемого воздуха увеличивается скорость потока и вследствие улучшения условий горения возрастает температура пламени в рассматриваемой точке А.

Перейдем к описанию результатов измерения электрического тока на модели.



Фиг. 3. Зависимости безразмерного идущего в модель тока I^0 от расхода G_a воздуха в системе поддува. Кривая 1 – цилиндр (вариант 5 в таблице), кривая 2 – лопатка

На фиг. 3 показана зависимость (кривая 1) от G_a безразмерного идущего на цилиндр электрического тока $I^0 = I/|I_{\max}|$ при $L = 19$ см, $D = 4.6$ см, $l = 0.5$ см, где $|I_{\max}|$ – модуль максимального (отрицательного) тока, идущего на модель, равный в данном случае 69.7 нА. (Напомним, что ток выноса $I = -I$.) Согласно теории возникновения тока выноса в натуральных каналах и лабораторных моделях [3–5], качественная сторона которой была сжато описана в начале статьи, ток I должен быть отрицательным. В основном представленные данные подтверждают этот вывод. Наличие участка, при относительно малых G_a , на котором $I > 0$, может быть объяснено следующим образом. При малых G_a полнота сгорания пропана невелика, в пламени содержится достаточно большое число частиц сажи, и пламя имеет оранжевый оттенок. Согласно данным [6], частицы сажи заряжены положительно. При их оседании на поверхность или при соударении с нею эти частицы отдают поверхности свой заряд, и возникает положительный ток на модель. С увеличением G_a полнота сгорания растет, концентрация частиц сажи в пламени уменьшается, пламя просветляется, и в основном начинает работать механизм диффузии электронов и ионов в приповерхностном слое, который описан в [3–5].

В соответствии с теорией [3–5] для тока I имеет место следующая качественная оценка:

$$I \sim enVr_d Z \sim Vn^{1/2} \left(\frac{kT}{4\pi} \right)^{1/2} Z \left(r_d^2 = \frac{kT}{4\pi e^2 n} \right) \quad (2.1)$$

где V , T , n – характерные значения скорости газа, его температуры и концентрации заряженных частиц на границе развивающегося на поверхности электрического

диффузионного пограничного слоя, Z – характерный периметр поперечного сечения модели, r_d – дебаевский радиус, e – заряд электрона, k – постоянная Больцмана. Поэтому при дальнейшем увеличении G_a , когда скорость газа в пламени возрастает, а T и n растут вследствие улучшения условий горения, ток $|I|$ в соответствии с приведенной формулой должен монотонно увеличиваться, что и подтверждается поведением зависимости $I^\circ(G_a)$ в диапазоне изменения G_a от 50 до 80 см³/с. Следующее за этим уменьшение $|I^\circ|$ объясняется так. При больших G_a происходит уменьшение длины и поперечного размера факела, в результате чего факел располагается внутри цилиндра и соприкасается с его внутренней поверхностью по меньшей площади.

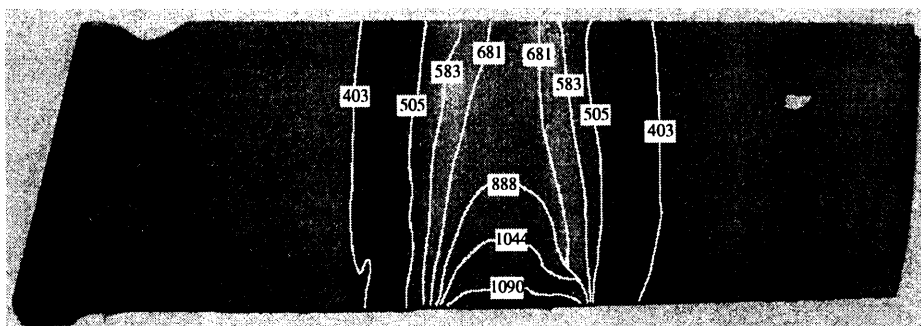
Результаты измерений тока $|I_{\max}|$ на цилиндр при его различных геометрических параметрах приведены в таблице. Здесь же указаны величины расхода G_a , при которых достигаются максимальные значения тока на цилиндр.

Номер	L , см	D , см	l , см	G_a , см ³ /с	$ I_{\max} $, нА
1	23.5	2.4	0.5	73	38.6
2	19	4.6	3	97	49.1
3	23.5	2.4	3	62	50.4
4	35	4.6	3	85	59.8
5	19	4.6	0.5	85	69.7
6	35	4.6	0.5	85	73.2

Как следует из таблицы, при изменении геометрических параметров в указанных диапазонах максимальная величина тока выноса $|I_{\max}|$ изменяется не более чем в 2 раза.

На фиг. 3 представлена также зависимость $I^\circ(G_a)$ для лопатки (кривая 2), расположение и геометрические параметры которой указаны в разд. 1. Соответствующее значение $|I_{\max}| = 120$ нА. Характер кривой 2 такой же, как для зависимости $I^\circ(G_a)$ для цилиндра. Отличие кривых 1 и 2 состоит в том, что область рабочих, не срывных, режимов (по расходу G_a) для лопатки значительно шире, чем для цилиндра. Это объясняется тем, что цилиндр, экспериментальные данные для которого представлены кривой 1, расположен гораздо ближе к газогорельному источнику, чем лопатка. Цилиндр при таком расположении оказывает некоторое "запирающее" воздействие на струю. При большем расстоянии между источником и цилиндром срыв пламени происходит при больших значениях G_a .

На фиг. 4 показаны изотермы на поверхности рассматриваемой лопатки при $G_a = 150$ см³/с, полученные с помощью нанесенных на лопатку термокрасок. Температура поверхности по направлению от критической точки к задней кромке лопатки непрерывно уменьшается. В этой связи необходимо заметить следующее. Оценка (2.1) получена в предположении, что роль отрицательных ионов, имеющих в потоке, невелика. Это предположение хорошо выполняется при большой температуре потока, так как отрицательные ионы в этом случае практически отсутствуют. При уменьшении температуры становится существенной реакция прилипания электронов к нейтральным молекулам, в результате чего концентрация отрицательных ионов возрастает, и при малой температуре в потоке имеются только положительные и отрицательные ионы, которые обладают практически одинаковыми коэффициентами диффузии. Согласно теории приэлектродных диффузионных процессов [4, 5], нарушение электрической квазинейтральности потока в этом случае ослабляется, и ток на модель (ток выноса) стремится к нулю. Поэтому электрический ток в поверхности лопатки генерируется только вблизи критической точки лопатки, где температура газа и лопатки достаточно высока.



Фиг. 4. Изотермы на поверхности лопатки, установленной в диффузионном пламени

С помощью полученных экспериментальных данных для тока I , идущего в лопатку, и приближенной формулы (2.1) можно оценить концентрацию n заряженных частиц (ионов и электронов) в электрически квазинейтральном набегающем потоке. Полагая, согласно экспериментальным данным, $I = 100$ нА, $V = 40$ м/с, $T = 1300$ К, $Z = 6$ см, находим $n \approx 10^{10}$ см⁻³. (При оценке величины Z считалось, что линейный, вдоль размаха лопатки, размер зоны взаимодействия потока с ее поверхностью приблизительно равен 3 см (см. фиг. 4), и при этом учитывались две стороны лопатки.) Полученное значение концентрации заряженных частиц в пламени согласуется с данными специальных экспериментальных исследований, приведенными в монографии [6].

Заключение. Проведено экспериментальное исследование процесса возникновения электрического тока выноса из цилиндрического канала, по которому протекает высокотемпературный газ, и тока, стекающего в след за лопаткой при ее обтекании высокотемпературным потоком газа. Рабочая среда создавалась на газогорельной установке, в которой осуществлялось горение пропановоздушной смеси в спутном потоке воздуха. Эксперименты с цилиндрическим каналом моделировали возникновение тока выноса в тракте авиационного двигателя в результате развития диффузионных электрических слоев на стенках тракта. Эксперименты с лопаткой моделировали указанные процессы на внутренних элементах двигателя. Были измерены электрические токи, идущие на цилиндр или лопатку, при различных условиях работы газогорельной установки. Равные им по модулю, но противоположные по знаку токи являются искомыми токами выноса из экспериментальных моделей.

Все полученные экспериментальные результаты качественно подтверждают разрабатываемую в настоящее время теорию возникновения тока двигательной электризации вследствие нарушения электрической квазинейтральности потока вблизи стенок авиационного канала и на внутренних элементах двигателя. На основе полученных экспериментальных результатов и теоретических оценок определена концентрация заряженных частиц в рабочей среде – диффузионном пламени, которая оказалась равной 10^{10} см⁻³, что согласуется с данными специальных экспериментов с диффузионными пламенами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 99-01-00983).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Имянитов И.М.* Электризация самолетов в облаках и осадках. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 211 с.
2. *Ватажин А.Б., Грабовский В.И., Лихтер В.А., Шульгин В.И.* Электрогазодинамические течения. М.: Наука, 1983. 344 с.

3. *Ватажин А.Б., Улыбышев К.Е.* Модель формирования электрического тока выноса в каналах авиационных реактивных двигателей // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 5. С. 139–148.
4. *Ватажин А.Б., Улыбышев К.Е.* Диффузионные и электрические процессы в турбулентном пограничном слое и в окрестности критической точки обтекаемого тела // Изв. РАН МЖГ. 2001. № 3. С. 102–110.
5. *Ватажин А.Б., Улыбышев К.Е., Холщевникова Е.К. и др.* Электрические диффузионные процессы на высокотемпературной турбинной лопатке и ее вклад в ток выноса из авиационного двигателя // ТВГ. 2002. Т. 40. № 3. С. 1–72.
6. *Lawton J., Weinberg F.* Electrical Aspects of Combustion. Oxford: Clarendon Press, 1969.
Лаутон Дж., Вейнберг Ф. Электрические аспекты горения. М.: Энергия, 1976. 294 с.

Москва

Поступила в редакцию
16.VII.2001