

Эффективность применения сепарирующих устройств в энергетических установках на металлизированных топливах

© Е.А. Андреев, А.Н. Бобров, С.Ф. Максимов

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

Представлены методика и результаты теоретического анализа эффективности применения сепарирующих устройств, предназначенных для работы в составе турбинного привода энергетической установки. Проанализированы показатели и выработаны критерии энергетической эффективности применения сепарирующего устройства в составе энергоустановки.

Ключевые слова: установка бортовая энергетическая, турбина, продукты сгорания, рабочее тело многофазное, удельная мощность, КПД, эффективность энергетическая.

Развитие ракетной техники и авиации идет по пути использования более энергоемких топлив, в том числе металлизированных. Энергетические установки на таких топливах работают при давлении до 20 МПа и температуре до 3000 К. Продукты сгорания этих топлив характеризуются наличием твердых частиц с высокой химической и эрозионной активностью, исходная массовая концентрация частиц конденсированной фазы достигает 0,6 [1–3]. Подача их непосредственно в проточную часть турбины приводит к ее быстрому выходу из строя [4, 5], что потребовало создания высокоэффективных предтурбинных сепарирующих устройств. Для анализа их работы в составе энергосиловой установки и оценки эффективности рассмотрим обобщенную расчетную схему работы сепаратора (рис. 1).

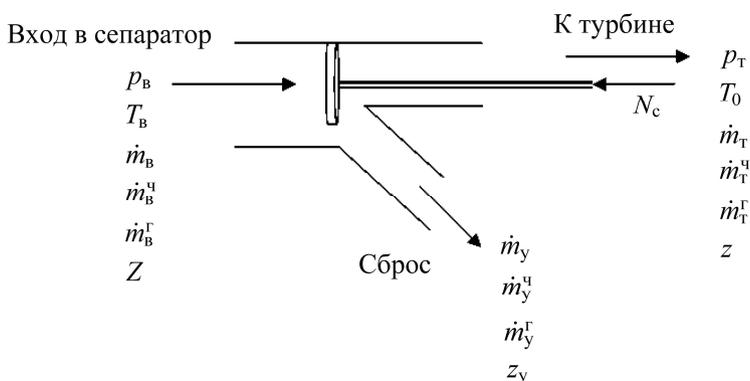


Рис. 1. Расчетная схема работы сепаратора

На вход сепаратора под давлением p_B при температуре T_B поступает массовый расход многофазных продуктов сгорания \dot{m}_B , состоящий из расходов частиц конденсированной фазы $\dot{m}_B^{\text{ч}}$ и газа $\dot{m}_B^{\text{г}}$:

$$\dot{m}_B = \dot{m}_B^{\text{ч}} + \dot{m}_B^{\text{г}}. \quad (1)$$

Соотношение частиц и газа определяется массовой концентрацией Z частиц в продуктах сгорания, которую можно рассчитать, используя, например, комплекс программ для термодинамического расчета состава и свойств многофазных гетерогенных продуктов сгорания «ТЕРА-НІДРО» [6–8]:

$$Z = \frac{\dot{m}_B^{\text{ч}}}{\dot{m}_B^{\text{ч}} + \dot{m}_B^{\text{г}}}. \quad (2)$$

Учитывая (1) и (2), легко выразить массовые расходы частиц и газа через массовый расход на входе в сепарирующее устройство:

$$\dot{m}_B^{\text{ч}} = Z \dot{m}_B; \quad (3)$$

$$\dot{m}_B^{\text{г}} = (1 - Z) \dot{m}_B. \quad (4)$$

Введем понятие коэффициента сепарации K_c как отношения массового расхода частиц, удаляемых сепаратором на сброс ($\dot{m}_y^{\text{ч}}$), к массовому расходу частиц, поступающих на вход сепарирующего устройства ($\dot{m}_B^{\text{ч}}$):

$$K_c = \frac{\dot{m}_y^{\text{ч}}}{\dot{m}_B^{\text{ч}}}. \quad (5)$$

Коэффициент сепарации — один из важнейших показателей эффективности сепарирующего устройства, для идеального сепарирующего устройства его значение стремится к единице.

Массовый расход газа утечек $\dot{m}_y^{\text{г}}$, с одной стороны, вынужденно попадает в патрубок сброса между частицами, а с другой — его энергия используется для транспортирования частиц [9, 10]. Расход газа утечек является еще одним важнейшим показателем эффективности сепарирующего устройства и в безразмерном виде может быть оценен коэффициентом q утечки чистого газа:

$$q = \frac{\dot{m}_y^{\text{г}}}{\dot{m}_B^{\text{г}}}. \quad (6)$$

Выражая $\dot{m}_y^{\text{ч}}$ из (5) и $\dot{m}_y^{\text{г}}$ из (6) и подставляя в них (3) и (4), можно определить расходы газа, частиц и их суммарный расход, попадающие в утечки:

$$\dot{m}_y^{\text{ч}} = Z K_c \dot{m}_B; \quad (7)$$

$$\dot{m}_y^{\Gamma} = q(1-Z)\dot{m}_B; \quad (8)$$

$$\dot{m}_y = \dot{m}_y^{\text{ч}} + \dot{m}_y^{\Gamma}. \quad (9)$$

Массовая концентрация частиц в магистрали сброса z_y определяется отношением

$$z_y = \frac{\dot{m}_y^{\text{ч}}}{\dot{m}_y^{\text{ч}} + \dot{m}_y^{\Gamma}}. \quad (10)$$

Подставляя в (10) формулы (7) и (8), можно получить выражение для массовой концентрации частиц в патрубке сброса:

$$z_y = \frac{ZK_c}{ZK_c + q(1-Z)}. \quad (11)$$

Для обеспечения устойчивой работы сепарирующего устройства необходимо, чтобы массовая концентрация частиц в патрубке сброса z_y не превышала некоторого предельного значения, определяемого из условия работы пневмотранспорта частиц. Экспериментально получено, что предельные значения массовой концентрации частиц $z_y < 0,97$.

С выхода сепаратора на турбину поступает поток под давлением p_T при температуре T_0 и массовом расходе \dot{m}_T , состоящем из массовых расходов частиц, не удаленных из потока ($\dot{m}_T^{\text{ч}}$), и чистого газа (\dot{m}_T^{Γ}), оставшегося после ухода газа утечек:

$$\dot{m}_T = \dot{m}_T^{\text{ч}} + \dot{m}_T^{\Gamma}; \quad (12)$$

$$\dot{m}_T^{\text{ч}} = \dot{m}_B^{\text{ч}} - \dot{m}_y^{\text{ч}}; \quad (13)$$

$$\dot{m}_T^{\Gamma} = \dot{m}_B^{\Gamma} - \dot{m}_y^{\Gamma}. \quad (14)$$

Подставляя в (13) $\dot{m}_y^{\text{ч}}$ из (7), а $\dot{m}_B^{\text{ч}}$ из (3) и аналогично в (14) \dot{m}_y^{Γ} из (8), а \dot{m}_B^{Γ} из (4) и используя (12), массовый расход очищенных продуктов, поступающих на турбину (\dot{m}_T), можно выразить через массовый расход смеси на входе в сепаратор (\dot{m}_B):

$$\dot{m}_T = \dot{m}_B [1 - ZK_c - (1-Z)q]. \quad (15)$$

Остаточную массовую концентрацию частиц, попадающих на турбину, рассчитывают по формуле

$$z = \frac{\dot{m}_T^u}{\dot{m}_T^u + \dot{m}_T^r}. \quad (16)$$

Остаточная массовая концентрация частиц z может быть выражена через исходную концентрацию частиц Z , коэффициенты сепарации K_c и коэффициент утечки чистого газа (с использованием выражений (3), (4), (8), (9), (13), (14), (16)):

$$z = \frac{(1 - K_c)Z}{(1 - K_c)Z + (1 - Z)(1 - q)}. \quad (17)$$

Для обеспечения эрозионной стойкости проточной части турбины, согласно экспериментальным оценкам, остаточное массовое содержание частиц не должно превышать значения $z < 0,06$.

Потери полного давления на сепараторе можно охарактеризовать коэффициентом снижения давления:

$$\pi_c = \frac{p_T}{p_B}. \quad (18)$$

При использовании предтурбинного сепаратора полезная мощность $N_{T,c}$, выдаваемая турбиной, будет меньше мощности турбины N_T без сепаратора на величину мощности N_c , отбираемой на работу самого сепаратора:

$$N_{T,c} = N_T - N_c.$$

Для оценки значения N_c введем понятие коэффициента отбора мощности ζ_N :

$$\zeta_N = \frac{N_c}{N_T}. \quad (19)$$

Тогда полезная мощность турбины с предтурбинным сепарирующим устройством, выраженная через коэффициент отбора мощности ζ_N , может быть рассчитана по формуле

$$N_{T,c} = N_T(1 - \zeta_N). \quad (20)$$

Эффективность работы сепаратора в составе турбинного привода энергосиловой установки можно оценить, сравнивая мощности турбин, работающих на чистом газе без частиц и на рабочем теле, полученном после очистки продуктов сгорания с помощью сепаратора.

Мощность турбины N_T рассчитывают как произведение расхода \dot{m}_T , проходящего через турбину, удельной адиабатной рабо-

ты $L_{ад}$, совершаемой газом при расширении в турбине, и КПД турбины η_T :

$$N_T = \dot{m}_T L_{ад} \eta_T. \quad (21)$$

Если полагать газ идеальным, то удельную адиабатную работу, совершаемую газом при степени расширения газа δ (равной отношению давлений на входе и на выходе из турбины), можно найти по хорошо известной формуле

$$L_{ад} = \frac{k}{k-1} R_T T_0 \left[1 - \left(\frac{1}{\delta} \right)^{(k-1)/k} \right], \quad (22)$$

где k — показатель процесса; R_T — газовая постоянная; T_0 — температура газа перед турбиной.

Считая тепловые потери в сепараторе малыми, можно принять, что температуры смеси на входе (T_B) и на выходе из сепаратора (T_0) равны. Полагая потери полного давления на сепараторе равными π_c , степень расширения на турбине равной δ , адиабатную работу турбины на многофазном рабочем теле $L_{ад.с}$ можно найти по формуле [11]

$$L_{ад.с} = \frac{n}{n-1} R_{см} T_0 \left[1 - \left(\frac{1}{\delta \pi_c} \right)^{(n-1)/n} \right], \quad (23)$$

где $R_{см}$ — газовая постоянная смеси; n — показатель процесса. Газовая постоянная смеси $R_{см}$ позволяет учесть снижение работоспособности многофазной смеси пропорционально массовой доле газа в продуктах сгорания, поступающих на турбину:

$$R_{см} = R_T (1-z), \quad (24)$$

где z — остаточная массовая концентрация частиц в потоке, поступающем на турбину. Показатель процесса может быть оценен по формуле [11]

$$n = \frac{(1-z) + z c_q / c_p^r}{(1-z)/k + z c_q / c_p^r}, \quad (25)$$

где k — показатель адиабаты газовой составляющей многофазного потока; c_q — среднемассовая удельная теплоемкость частиц конденсированной фазы; c_p^r — изобарная теплоемкость газовой составляющей многофазного потока.

Таким образом, используя формулы (15), (20), (21) и (23), полезную мощность, выдаваемую турбиной с предвключенным сепаратором, можно оценить по формуле

$$N_{T.c} = (1 - \zeta_N) \dot{m}_B [1 - ZK_c - (1 - Z)q] \times \\ \times \frac{n}{n-1} R_T (1-z) T \left[1 - \left(\frac{1}{\delta \pi_c} \right)^{(n-1)/n} \right] \eta_{T.c}. \quad (26)$$

Введем понятие коэффициента эффективности сепаратора η_c как отношения мощностей турбин, работающих на чистом газе без частиц N_T и на рабочем теле $N_{T.c}$, полученном после очистки продуктов сгорания с помощью сепаратора:

$$\eta_c = \frac{N_{T.c}}{N_T}. \quad (27)$$

Подставляя в (27) выражения из (21), (22) и (26), получим формулу для коэффициента эффективности сепаратора:

$$\eta_c = (1 - \zeta_N) \frac{[1 - ZK_c - (1 - Z)q](1 - Z)(1 - q)}{(1 - K_c)Z + (1 - Z)(1 - q)} \times \\ \times \frac{\frac{n}{n-1} \left[1 - \left(\frac{1}{\delta \pi_c} \right)^{(n-1)/n} \right]}{\frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{1}{\delta} \right)^{(k-1)/k} \right]} \frac{\eta_{T.c}}{\eta_T}. \quad (28)$$

Для упрощения (28) проанализируем характер влияния входящих в полученное выражение составляющих.

Сначала проанализируем влияние сомножителя A , рассчитываемого по формуле

$$A = \frac{n}{n-1} \frac{k-1}{k} \frac{\left[1 - (1/\delta \pi_c)^{(n-1)/n} \right]}{\left[1 - (1/\delta)^{(k-1)/k} \right]}. \quad (29)$$

При значениях перепада давления $\delta > 15$, характерных для сверхзвуковых высокоперепадных турбин, и значениях коэффициента снижения давления $\pi_c > 0,9$ влияние π_c несущественно. При малых остаточных концентрациях $z < 0,06$ и отношениях $c_q/c_p^* \approx 0,7$ (характерных для частиц конденсированной фазы из оксидов магния и алюминия) различие показателей процессов n и k (см. (25)) не слиш-

ком велико. С учетом этих факторов и прямых численных оценок значений A можно заключить, что множитель имеет значение порядка $A \approx 1$ при погрешности в 2...3 %.

Основное отличие КПД турбины, работающей на многофазном рабочем теле и чистом газе, связано с наличием двухфазных потерь.

При малых остаточных массовых концентрациях частиц $z < 0,06$ можно принять, что двухфазные потери на активной парциальной турбине пропорциональны массовой концентрации частиц [11]:

$$\frac{\eta_{т.с}}{\eta_{т}} = 1 - z. \quad (30)$$

Подставляя в (30) выражение (17), получаем

$$\frac{\eta_{т.с}}{\eta_{т}} = \frac{(1-Z)(1-q)}{(1-K_c)Z + (1-Z)(1-q)}. \quad (31)$$

Таким образом, подставляя в (28) значение $A=1$ и отношение (31), окончательно получаем выражение для оценки коэффициента эффективности сепарации:

$$\eta_c = (1 - \zeta_N) [1 - ZK_c - (1-Z)q] \left[\frac{(1-Z)(1-q)}{(1-K_c)Z + (1-Z)(1-q)} \right]^2. \quad (32)$$

На рис. 2 изображено поле значений η_c , рассчитанное по зависимости (32), при актуальных для сепараторов значениях q и K_c , отсутствии подвижных частей ($\zeta_N = 0$) и исходной массовой концентрации частиц $Z = 0,316$ (выбранной в качестве примера). Штриховкой выделена область с границей 1, рассчитанной по уравнению (17). Она определяет условие $z < 0,06$, показывающее, при каких значениях q и K_c остаточное содержание частиц не приводит к катастрофическим нарушениям работы сепаратора вследствие эрозионного изнашивания. Линия 2 — граница области, рассчитанная по уравнению (11) из условия $z < 0,97$, обеспечивающего возможность пневмотранспортирования массового расхода частиц газом, попадающим в утечки.

На рисунке видно, что значение мощности турбины с предтурбинным сепаратором при исходной концентрации частиц $Z = 0,316$ и остаточной концентрации $z < 0,06$ составит порядка 52...65 % от мощности турбины, работающей на чистом газе, с тем же составом газовой фазы и расходом.

Очевидно, что вопрос о целесообразности применения металлизированных топлив для энергосиловых установок с турбинным приводом требует более детального анализа. Поскольку допустимые значе-

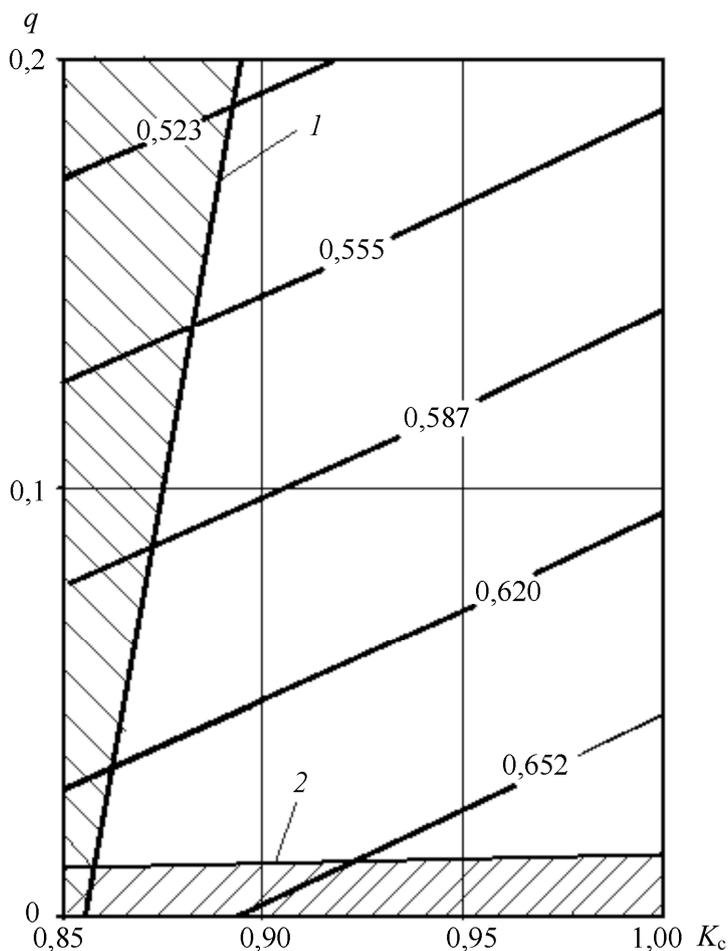


Рис. 2. Достижимые значения коэффициента сепарации

ния температуры рабочего тела перед турбиной ограничены, то получить полезный эффект от применения металлизированного топлива можно только на средних энергосиловых установках, в которых используется внешнее рабочее тело (окислитель). Для иллюстрации этого положения с помощью программы «ТЕРА-НІДРО» были рассчитаны термодинамические характеристики продуктов сгорания твердого топлива на основе углеводородного связующего и перхлората аммония, которые реагировали в соотношении, близком к стехиометрическому, а затем разбавлялись внешним окислителем до получения температуры, допустимой с точки зрения обеспечения стойкости турбины (например, 1000 К). Аналогичные характеристики продуктов сгорания были рассчитаны и для металлизированного топлива, содержащего помимо углеводородного связующего (6 %) и перхлората аммония (17 %) добавки алюминия (57 %) и магния (20 %).

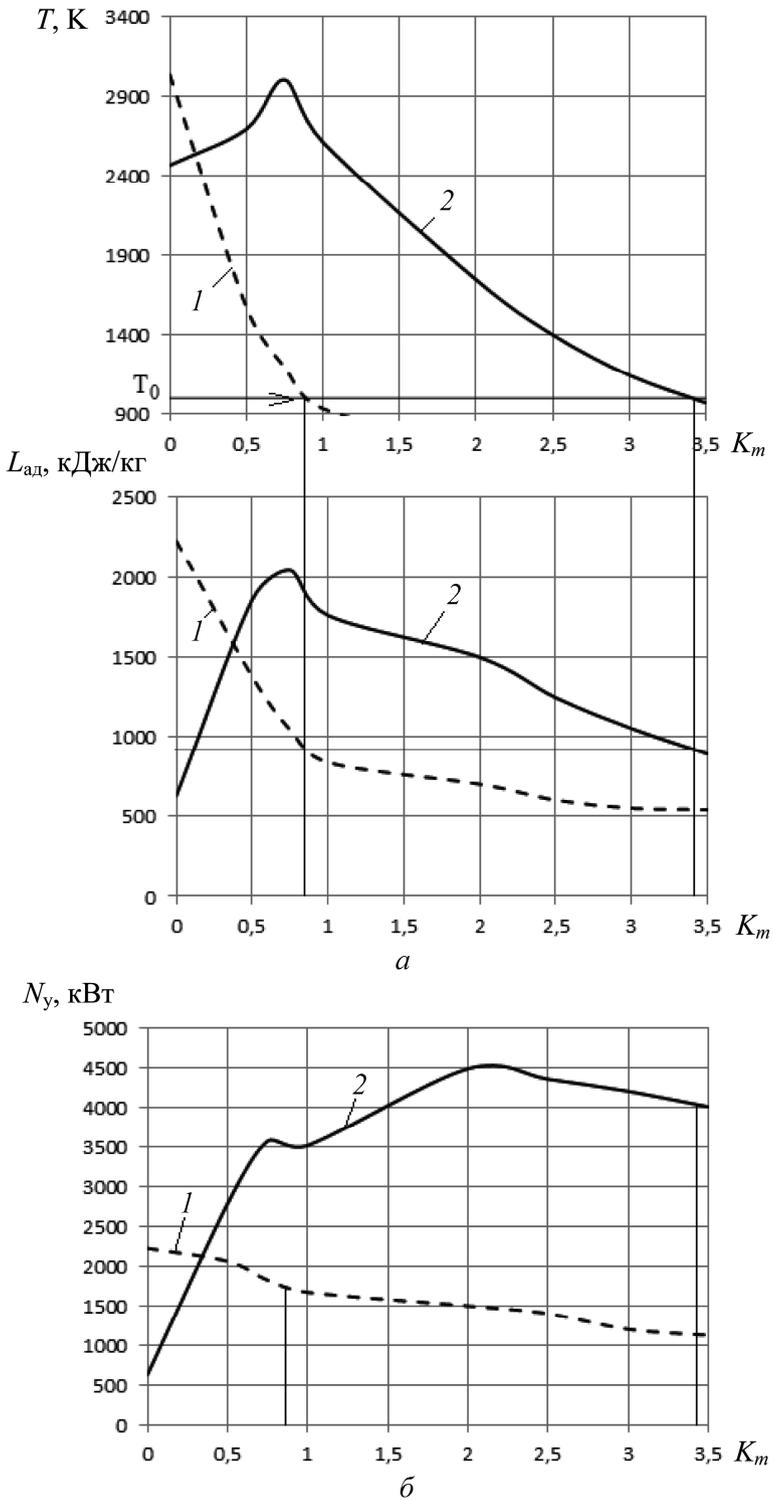


Рис. 3. Сравнение параметров энергосиловых установок с турбоприводом, работающих на безметалльном (1) и металлизированном (2) топливе

Результаты расчетов представлены на рис. 3, *а* в виде зависимостей температуры продуктов сгорания и их удельной адиабатной работы (при степени расширения газа $\delta = 25$) от массового соотношения расходов внешнего рабочего тела и топлива, обозначенного K_m . Видно, что допустимой температуры T_0 металлизированное топливо достигает при существенно большем значении K_m , поскольку внешний окислитель может химически реагировать с металлическими добавками.

Можно отметить, что значения удельной адиабатной работы при допустимой температуре T_0 на входе в турбину меньше, чем максимально возможные значения, которые реализуются при очень высоких температурах (существенно выше допустимой). Поэтому целесообразно выбирать минимальные значения K_m , обеспечивающие снижение температуры до T_0 . При расчете располагаемых удельных мощностей турбин N_y , результаты которого представлены на рис. 3, *б*, была учтена особенность средних энергосиловых установок, заключающаяся в том, что массовый расход продуктов сгорания, поступающих на турбину, в $1 + K_m$ раз больше массового расхода топлива, хранимого на борту. В результате удельная располагаемая работа турбины при $T_0 = 1000$ К и $\delta = 25$ на безметальном топливе составит порядка $N_{y1} = 1830$ кВт ($K_m \approx 0,75$), а условная располагаемая работа турбины при $T_0 = 1000$ К и $\delta = 25$ на металлизированном топливе — около $N_{y2} = 4010$ кВт ($K_m \approx 3,5$, исходное массовое содержание частиц $Z = 0,316$), что в 2,19 раз больше. Однако из-за необходимости очистки продуктов сгорания металлизированного топлива от частиц конденсированной фазы с помощью сепарирующего устройства мощность турбины на металлизированном топливе снизится в η_c раз. Полагая достижимыми значения $\eta_c = 0,52 \dots 0,62$ (см. рис. 2), можно считать, что применение турбинного привода с сепаратором позволит при использовании рассмотренных топлив и принятой схемы организации рабочих процессов получить выигрыш в удельной мощности турбины по сравнению с применением безметального топлива на 15...35 % соответственно.

Таким образом, можно отметить, что достигнутые характеристики сепарирующих устройств (q и K_c) существенно влияют на эффективность применения металлизированных топлив в турбинных приводах энергосиловых установок.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шахиджанов Е.С., Мяндин А.Ф. *Реактивные двигатели подводных аппаратов на твердом топливе*. Москва, 2005, 232 с.
- [2] Дубенец С.А., Гаранин И.В. *Двигательные установки подводных аппаратов*. Москва, МАИ, 1993.
- [3] Шахиджанов Е.С., Мяндин А.Ф. Ракетные двигатели на твердом топливе для подводных скоростных и высокоскоростных ракет. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2004, № 3 (спецвып.), с. 143–150.
- [4] Дейч М.Е., Трояновский Б.М. *Исследование и расчет влажнопаровых турбин*. Москва, МЭИ, 1993, 146 с.
- [5] Венедиктов В.Д. *Турбины и реактивные сопла на двухфазных потоках*. Москва, Машиностроение, 1969, 194 с.
- [6] Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. *Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах*. Москва, Металлургия, 1994, 352 с.
- [7] Трусов Б.Г. Моделирование кинетики химических превращений: термодинамический подход. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2005, № 3, с. 26–38.
- [8] Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012, № 2 (спецвып.): Программная инженерия, с. 240–249.
- [9] Мартюшин И.Г. *Теория псевдоожигения*. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, МИХМ, 1965.
- [10] Разумов И.М. *Псевдоожигение и пневмотранспорт сыпучих материалов*. Москва, Химия, 1972, 240 с.
- [11] Максимов С.Ф. *Изучение энергетических характеристик активной турбины на однофазном и двухфазном рабочем теле*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 46 с.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Андреев Е.А., Бобров А.Н., Максимов С.Ф. Эффективность применения сепарирующих устройств в энергетических установках на металлизированных топливах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/703.html>

Андреев Евгений Александрович родился в 1961 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1984 г.; канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; область научных интересов — рабочие процессы в ракетных двигателях. e-mail: aea-704@mail.ru

Бобров Александр Николаевич родился в 1961 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1984 г.; канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; область научных интересов — рабочие процессы в ракетных двигателях. e-mail: alexbobr@mail.ru

Максимов Станислав Федорович родился в 1941 г.; канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; область научных интересов — исследование турбонасосных агрегатов ракетных двигателей. e-mail: maxsimov.s@mail.ru