

УДК 62-9

О.А. Зуева, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

А.М. Клещевников

ОАО «Протон-ПМ», г. Пермь

ВЫБОР ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА

Рассмотрены вопросы выбора режимных и геометрических параметров камеры сгорания (КС) для утилизации разнородного по составу, неочищенного, влажного попутного нефтяного газа (ПНГ) в энергоустановках для выработки электрической и тепловой энергии на малодебитных месторождениях. Условно КС делится на зону горения (обеспечение устойчивости горения ПНГ различных месторождений) и зону разбавления (обеспечение заданного температурного уровня на входе в газовую турбину). Вторичный воздух для разбавления продуктов сгорания одновременно является охладителем для жаровой трубы (ЖТ) и подается в зону разбавления через щели и отверстия из кольцевого канала между ЖТ и кожухом. Разработанная конструкция КС предусматривает использование серийной горелки в зоне горения, а длина ЖТ на 2 % меньше длины кожуха. ЖТ работает в высокотемпературной коррозионно-активной среде, поэтому в процессе термодинамических расчетов определены состав и температура продуктов сгорания по длине КС. Длина и диаметр ЖТ определяются по принятым неравномерности температурного поля на входе в турбину и объемной теплонапряженности. Для качественного перемешивания вторичного воздуха с продуктами сгорания внутри ЖТ соотношение их динамических напоров принято равным 30. Приведенные в статье результаты получены при линейной зависимости коэффициента избытка воздуха по длине КС, которая далее будет уточняться в процессе доводочных испытаний КС.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ, неравномерность температурного поля, первичный и вторичный воздух, жаровая труба, кожух, многозонная камера сгорания, динамический напор, устойчивость горения, коэффициент избытка воздуха, температура и состав продуктов сгорания, зона горения, зона разбавления.

O.A. Zueva, N.L. Bachev, R.V. Bulbovich

Perm National Research Polytechnic University

A.M. Kleshchevnikov

“Proton-PM” JSC, Perm

CHOICE OF GEOMETRICAL AND REGIME PARAMETERS OF THE COMBUSTION CHAMBER FOR UTILIZATION OF ASSOCIATED PETROLEUM GAS

It is considered the choice of regime and geometrical parameters of the combustion chamber for utilization heterogenous, rough, humid associated petroleum gas in power plants for generation of electric and thermal energy in low-yield field. Conditionally the combustion chamber is divided on combustion zone (providing the combustion stability of associated petroleum gas of various fields) and dilution zone (providing the set temperature level at gas-turbine entrance). Secondary air is used for dilution of combustion products and simultaneously it is coolant for flame tube. The secondary air is fed in a dilution zone through slots and orifices from annular duct between flame tube and casing. The developed construction of combustion chamber assumes the using of serial burner in combustion zone. Length of combustion flame is less than length of casing at 2%. Flame tube operates in the high-temperature corrosion-active environment, so in the course of thermodynamic calculations the composition and temperature of combustion products along combustion chamber are determined. Length and diameter of flame tube are determined on accepted unevenness of a temperature field at turbine entrance and volume thermal stress. For high-quality mixing of secondary air with combustion products in flame tube the ratio of their dynamic pressures is accepted equal 30. The results given in article are obtained by linear dependence of excess air coefficient along combustion chamber which will be specified further in the course of development test of combustion chamber.

Keywords: associated petroleum gas, unevenness of temperature field, primary and secondary air, flame tube, casing, multizone combustion chamber, dynamic pressure, combustion stability, excess air coefficient, temperature and composition of combustion products, combustion zone, dilution zone.

КС предназначена для преобразования химической энергии топливного газа в тепловую энергию путем его непрерывного сжигания в потоке воздуха. Рабочий процесс в КС представляет собой совокупность процессов подготовки топливоздушнoй смеси, ее непрерывного поджигания, собственно горения и разбавления вторичным воздухом, в результате чего образуется высокотемпературное рабочее тело ($T = 700...950\text{ }^{\circ}\text{C}$) для привода газовой турбины энергоустановки.

ПНГ – это углеводородный газ, находящийся в нефтяных залежах в растворенном состоянии и выделяющийся из нефти при снижении давления. Количество газа, приходящееся на 1 т нефти, зависит от условий формирования и залегания нефтяных месторождений и может составлять от 1–2 до нескольких тысяч кубометров. Основными со-

ставляющими ПНГ являются предельные углеводороды – от метана CH_4 до гексана C_6H_{14} . Кроме того, в составе ПНГ присутствуют азот N_2 , углекислый газ CO_2 , сероводород H_2S и меркаптаны [1]. Показатели ПНГ, добываемого ОАО «ЛУКОЙЛ-Пермь» и ОАО «Ритек-Урал-ойл» на месторождениях Пермского края, представлены ниже.

Показатели ПНГ на месторождениях Пермского края:

Азот, N_2 , об. %	0,90–40,03
Углекислый газ CO_2 , об. %	0,07–1,75
Метан CH_4 , об. %	12,56–67,09
Этан C_2H_6 , об. %	7,59–29,51
Пропан C_3H_8 , об. %	4,19–36,78
Изобутан iC_4H_{10} , об. %	0,72–4,17
Нормальный бутан C_4H_{10} , об. %	1,43–10,43
Изопентан iC_5H_{12} , об. %	0,46–4,83
Нормальный пентан C_5H_{12} , об. %	0,38–4,04
Гексан C_6H_{14} , об. %	0,25–1,63
Сероводород H_2S , об. %	0,0001–7,0
Гелий He , об. %	0,0001–0,13
Плотность, кг/м^3	0,9–1,3
Низшая теплота сгорания, кДж/м^3 , ккал/ м^3	35112–54758 8400–13100
Число Воббе, кДж/м^3 , ккал/ м^3	36366–53086 8700–12700
Метановое число	28,7–52,5
Абсолютная влажность, г/м^3	2,8–3,8
Относительная влажность, %	33,0–50,0

С увеличением содержания азота в составе ПНГ сужаются пределы устойчивого горения топливовоздушной смеси. В топливовоздушной смеси, находящейся вне этих пределов, пламя не распространяется из-за увеличения тепловых потерь на нагрев инертного азота (смесь может вспыхнуть, но тут же погаснет).

При утилизации ПНГ в энергоустановках для выработки электрической и тепловой энергии исключительно важным является тщательное отслеживание качества топливного газа и предотвращение образования в нем жидких фракций. Жидкие фракции могут формироваться из конденсируемых высших углеводородов (пентан и выше), а также из влаги водяных паров влажного топливного газа. Для того чтобы исключить образование жидких фракций в топливной системе энергоустановки, необходимо определить температуру точки росы как по углеводородам, так и по воде при условиях эксплуатации. Для уда-

ления жидких фракций из состава топливного газа необходим его прогрев до подачи в топливную систему энергоустановки отработанным на газовой турбине рабочим телом в специально разработанном теплообменнике. Компримирование топливного газа перед подачей в КС повышает его температуру. Попадание жидких углеводородов в КС может привести к неконтролируемому самовозгоранию и распространению пламени вверх по потоку, называемому «обратное зажигание». Температура самовозгорания для тяжелых жидких фракций равна 204–288 °С. Контакт с воздухом при температурах выше данной приводит к мгновенному воспламенению капель жидкости и неконтролируемому подводу тепла к элементам конструкции КС [2].

С увеличением содержания сероводорода в составе ПНГ увеличивается концентрация серосодержащих соединений SO_x и паров H_2SO_4 в составе продуктов сгорания (ПС), что приводит к значительному коррозионному уносу конструкционных материалов по «горячему» тракту энергоустановки.

В газотурбинных установках значение температуры газа перед неохлаждаемой турбиной принимается обычно равным 700–950 °С по условиям работоспособности деталесборочных единиц (ДСЕ) турбины. Поскольку при таких условиях становится невозможной качественная организация процесса устойчивого горения ни одного вида топлива [3, 4], то для собственно горения топливного газа необходимо выделить зону горения с подводом первичного воздуха, обеспечивая условия устойчивого горения и высокую температуру процесса. Остальная часть циклового воздуха (вторичный воздух), минуя зону горения, через щели или ряды отверстий подается в зоны смешения (разбавления), где, смешиваясь с ПС зоны горения, обеспечивает заданный уровень температуры газов перед турбиной.

Была проведена серия расчетов для определения общего облика многозонной КС для сжигания разнородных по составу, неочищенных и влажных ПНГ различных месторождений и сравнения его с имеющимися КС авиационных, транспортных и стационарных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок [2]. Для дальнейших разработок рекомендуется многозонная КС с использованием в зоне горения серийной диффузионной горелки, неравномерностью температурного поля на выходе $\theta=0,17$, отношением длины ЖТ к ее диаметру $l_{ЖТ}/d_{ЖТ}=2,072$ и теплонапряженностью $H=21,0$ Дж/(м³·с·Па). Ниже

приводятся основные положения при выборе режимных и геометрических параметров в КС.

Длина ЖТ определяется из условия обеспечения заданной неравномерности температурного поля на выходе θ [5, 6]:

$$\frac{l_{\text{ЖТ}}}{d_{\text{ЖТ}}} = \left(A \frac{\Delta P_{\text{ЖТ}}}{q_{\text{ЖТ}}} \ln \frac{1}{1-\theta} \right)^{-1},$$

где эмпирический коэффициент $A = 0,07$ для трубчатой КС; $\Delta P_{\text{ЖТ}}$, $q_{\text{ЖТ}}$ – падение давления и скоростной напор в жаровой трубе. Неравномерность температурного поля на выходе

$$\theta = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{cp}}},$$

где T_{max} , T_{min} , T_{cp} – максимальная, минимальная и средняя температуры ПС по поперечному сечению на выходе из КС.

Площади миделевого сечения трубы $F_{\text{ЖТ}} = \frac{\pi d_{\text{ЖТ}}^2}{4}$ и кожуха $F_{\text{к}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4}$ связаны соотношением

$$F_{\text{ЖТ}} = k F_{\text{к}}.$$

По опыту предшествующих разработок коэффициент пропорциональности $k = 0,7 \dots 0,8$ для трубчатых КС.

Распределение площадей отверстий по длине жаровой трубы является важнейшим конструктивным параметром КС. От того, насколько правильно задано распределение воздуха, будут зависеть все основные характеристики КС – полнота сгорания, концентрация вредных и коррозионно-активных веществ в составе ПС и неравномерность температурного поля на входе в турбину. На стадии эскизного проектирования распределение воздуха следует задавать на основании статистических данных, полученных обобщением опыта проектирования КС.

В данной работе задавалось линейное распределение коэффициента избытка окислителя по длине ЖТ от $\alpha = 1,08$ в зоне горения до

$\alpha = 7,10$ на выходе из КС. Потребный расход вторичного воздуха в зону разбавления i

$$g_{ок_i} = \alpha_i K_{m0} g_{гор} - \sum_{j=1}^{i-1} g_{ок_j},$$

где α_i – коэффициент избытка окислителя в зоне разбавления i ; K_{m0} – стехиометрическое соотношение между воздухом и топливным газом; $g_{гор}$ – расход топливного газа в зону горения.

Скорость подачи вторичного воздуха в зону разбавления определяется по заданному отношению динамических напоров струи вторичного воздуха и потока ПС в ЖТ [5, 7]:

$$q = \frac{\rho_{ок} W_{ок}^2}{\rho_{ПС} W_{ПС}^2},$$

где по опыту предшествующих разработок $q = 20...30$; $\rho_{ок}$, $W_{ок}$ – плотность и скорость вторичного воздуха; $\rho_{ПС}$, $W_{ПС}$ – плотность и скорость ПС.

Потребная площадь отверстий в стенке ЖТ для подвода вторичного воздуха определяется по уравнению неразрывности

$$F_{ок} = \frac{g_{ок}}{\rho_{ок} W_{ок} \mu_{отв}},$$

где $\mu_{отв}$ – коэффициент расхода щелей или отверстий.

Скорость ПС в зоне i

$$W_{ПС_i} = \frac{\sum g_{ок_i} + g_{гор}}{\mu_{ЖТ} \rho_{ПС} F_{ЖТ}},$$

где $\mu_{ЖТ}$ – коэффициент расхода в ЖТ.

Высота кольцевого канала между ЖТ и кожухом

$$h = \frac{d_k - d_{ЖТ}}{2} - \delta_{ЖТ},$$

где d_k , $d_{ЖТ}$ – внутренние диаметры кожуха и жаровой трубы; $\delta_{ЖТ}$ – толщина жаровой трубы.

Время пребывания в зоне i

$$\tau_{\text{пр},i} = \frac{\pi d_{\text{ЖТ}}^2}{4} \left(\frac{\rho_{\text{ПС}} l}{g_{\text{ПС}}} \right)_i.$$

Для определения режимных и геометрических параметров по предложенной методике необходима информация о параметрах горения разнородных по составу ПНГ. С этой целью были проведены термодинамические расчеты процесса горения ПНГ 15 месторождений Пермского края. Приведенные в статье результаты получены с использованием параметров ПС, рассчитанных путем статистической обработки результатов термодинамического расчета с доверительной вероятностью 95 %. На рис. 1 показано распределение температуры ПС и коэффициента избытка воздуха по длине многозонной КС.

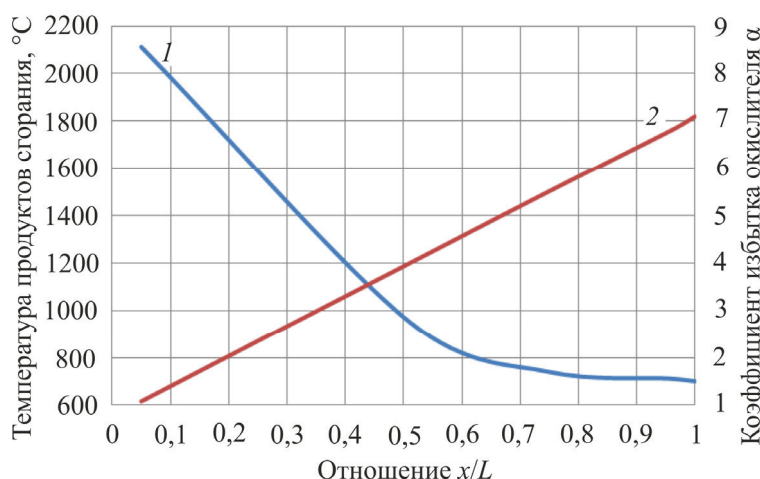


Рис. 1. Распределение температуры и коэффициента избытка воздуха по длине КС: 1 – температура ПС в КС; 2 – коэффициент избытка окислителя в КС

Режимные и геометрические параметры многозонной КС, полученные по приведенной выше методике с использованием данных термодинамического расчета (см. рис. 1), представлены ниже.

Режимные и геометрические параметры многозонной КС для сжигания ПНГ:

Выбор параметров камеры сгорания для утилизации попутного нефтяного газа

Массовый расход воздуха, кг/с	2,539
Массовый расход воздуха в зону горения, кг/с	0,386
Массовый расход воздуха в зоны разбавления, кг/с	2,153
Массовый расход топливного газа, кг/с	0,024
Коэффициент избытка воздуха в зоне горения	1,08
Температура ПС в зоне горения, К	2385,7
°С	2112,7
Давление воздуха на входе в КС, кПа	345,3
Температура воздуха на входе в КС, К	443
°С	170
Давление топливного газа на входе в КС, кПа	400
Температура топливного газа на входе в КС, К	288
°С	15
Давление на выходе из КС, кПа	328
Температура на выходе из КС, К	973
°С	700
Коэффициент избытка окислителя на выходе из КС	7,1
Стехиометрическое соотношение компонентов	14,9
Массовый расход ПС на выходе из КС, кг/с	2,563
Неравномерность температурного поля по поперечному сечению на выходе из КС	0,17
Внутренний диаметр жаровой трубы, м	0,460
Длина жаровой трубы, м	0,953
Толщина жаровой трубы, м	0,003
Внутренний диаметр кожуха, м	0,549
Толщина кожуха, м	0,005
Ширина кольцевого зазора между кожухом и жаровой трубой, м	0,042
Отношение динамических напоров вторичного воздуха и газа в жаровой трубе	30
Коэффициент расхода отверстий	0,8
Теплонапряженность, Дж/(м ³ ·с·Па)	21,0
Полнота сгорания топлива	0,98
Тепловая мощность, кВт	1183,0

Разрабатываемая КС должна надежно функционировать при сжигании ПНГ различных месторождений, отличающихся по составу, влажности и другим параметрам. Для обеспечения ресурса работы до 100 000 ч (капитальный ремонт 60 000 ч) необходим тщательный выбор хромоникелевых сплавов, работающих в высокотемпературной коррозионно-активной среде. С целью качественного выбора конструкционных материалов были проведены термохимические и термодинамические расчеты для определения состава ПС по длине КС. Результаты этих расчетов представлены на рис. 2.

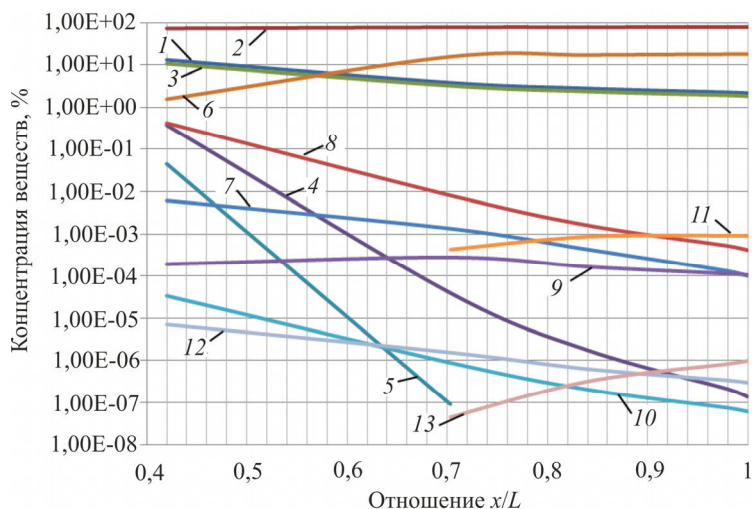


Рис. 2. Состав ПС по длине КС: 1 – H_2O ; 2 – N_2 ; 3 – CO_2 ; 4 – OH ; 5 – O ; 6 – O_2 ; 7 – SO_2 ; 8 – NO ; 9 – NO_2 ; 10 – N_2O ; 11 – SO_3 ; 12 – HNO_2 ; 13 – H_2SO_4

В ПС ПНГ наибольшую коррозионную активность имеют пары серной кислоты H_2SO_4 , оксид серы SO , диоксид серы SO_2 , триоксид серы SO_3 , пары воды H_2O [8]. Менее всего серосодержащие газы действуют на хром, поэтому с точки зрения скорости окисления хромистые стали предпочтительнее хромоникелевых. Содержание никеля в составе сплава необходимо не для уменьшения скорости окисления, а для обеспечения хороших механических свойств [9]. Подбором состава сплавов невозможно добиться достаточной стойкости материалов к агрессивному действию серосодержащих газов при высоких температурах – можно лишь говорить об относительном улучшении коррозионной стойкости.

Анализ составов ПС и существующих жаростойких сплавов показал, что при создании высокоресурсной КС для утилизации ПНГ целесообразно применение сплавов ХН60ВТ6, 20Х23Н18, 20Х25Н20С2 для ЖТ; 20Х23НВ, 12Х18Н10Т для кожуха, арматуры и крепежных изделий [10].

Таким образом, определены режимные и геометрические параметры высокоресурсной многозонной КС для утилизации разнородных по составу ПНГ различных малодобитных месторождений. Использование предложенной КС в составе энергоустановки позволяет вырабатывать 145 кВт электроэнергии.

Библиографический список

1. Андреева Н.Н., Миргородский В.Н., Мухаметшин В.Г. Национальное использование нефтяного газа: от анализа проблемы до реализации проектов // Нефтяное хозяйство. – 2007. – № 9. – С. 133–137.
2. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. – М.: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2006. – 584 с.
3. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1985. – 280 с.
4. Сударев А.В., Антоновский В.И. Камеры сгорания газотурбинных установок. Теплообмен. – Л.: Машиностроение, 1985. – 272 с.
5. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных установок. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – 220 с.
6. Григоренко П.П., Постнов В.Ф., Спиридонов Ю.А. Влияние режимных параметров камеры сгорания газотурбинной установки на неравномерность температурного поля газа // Горение в потоке. – 1978. – Вып. 2. – С. 65–70.
7. Онищик И.И. Исследование процесса смешения в модели смесителя кольцевой камеры сгорания // Теплоэнергетика. – 1973. – № 1. – С. 55–58.
8. Зуева О.А., Бульбович Р.В., Бачева Н.Ю. Расчет выбросов загрязняющих и коррозионно-активных веществ при сжигании серосодержащего попутного нефтяного газа в микрогазотурбинных энергетических агрегатах // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Аэрокосмическая техника. – 2012. – № 32. – С. 81–95.
9. Воробьева Г.Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. – М.: Химия, 1975. – 816 с.
10. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

References

1. Andreeva N.N., Mirgorodskiy V.N., Mukhametshin V.G. *Natsionalnoe ispolzovanie neftyanogo gaza: ot analiza problemy do realizatsii proektov* [National use of oil gas: from the problem analysis to implementation of projects]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2007, № 9, pp. 133-137.

2. Tsanev S.V., Burov V.D., Remezov A.N. *Gazoturbinnyye i parogazovyye ustanovki teplovykh elektrostantsiy* [Gas-turbine and steam-gas units of thermal power plants]. Moskovskiy energeticheskiy institut, 2006, 584 p.

3. Pchelkin Yu.M. *Kamery sgoraniya gazoturbinnyykh dvigateley* [Combustion chambers of gas-turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 280 p.

4. Sudarev A.V., Antonovskiy V.I. *Kamery sgoraniya gazoturbinnyykh ustanovok. Teploobmen* [Combustion chambers of gas-turbine units. Heat exchange]. Leningrad: Mashinostroenie, 1985, 272 p.

5. Mingazov B.G. *Kamery sgoraniya gazoturbinnyykh ustanovok* [Combustion chambers of gas-turbine units]. Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2006, 220 p.

6. Grigorenko P.P., Postnov V.F., Spiridonov Yu.A. *Vliyanie rezhimnykh parametrov kamery sgoraniya gazoturbinnoy ustanovki na neravnomernost temperaturnogo polya gaza* [Influence of regime parameters of gas-turbine unit combustion chamber on unevenness of gas temperature field]. *Gorenie v potoke*. 1978, no. 2, pp. 65-70.

7. Onishchik I.I. *Issledovanie protsessa smesheniya v modeli smesitelya koltsevoy kamery sgoraniya* [Research of mixture process in model of mixer of annular combustion chamber]. *Teploenergetika*, 1973, no. 1, pp. 55-58.

8. Zueva O.A., Bulbovich R.V., Bacheva N.Yu. *Raschet vybrosov zagryaznyayushchikh i korroziionno-aktivnykh veshchestv pri szhiganii serosoderzhashchego poputnogo neftyanogo gaza v mikrogazoturbinnyykh energeticheskikh agregatakh* [The calculation of the contaminated and corrosive substances emission during combustion of sulphur-containing associated petroleum gas in the microgas turbine units]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2012, no. 32, pp. 81-95.

9. Vorobeva G.Ya. *Korroziionnaya stoykost materialov v agressivnykh sredakh khimicheskikh proizvodstv* (Corrosion stability of materials in hostile environment of chemical manufactures). Moscow: Khimiya, 1975, 816 p.

10. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. *Marochnik staley i splavov* [Steels and alloys: grade guide]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 640 p.

Об авторах

Зуева Оксана Андреевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: oksanochka_zueva@mail.ru).

Бачев Николай Леонидович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: bnl54@yandex.ru).

Бульбович Роман Васильевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

Клещевников Алексей Михайлович (Пермь, Россия) – начальник отдела ОАО «Протон-ПМ» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93, e-mail: bnl54@yandex.ru).

About the authors

Zueva Oksana Andreevna (Perm, Russian Federation) – postgraduate student, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: oksanochka_zueva@mail.ru).

Bachev Nikolay Leonidovich (Perm, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: bnl54@yandex.ru).

Bulbovich Roman Vasilevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

Kleshchevnikov Aleksey Mikhaylovich (Perm, Russian Federation) – head of department, “Proton-PM” JSC (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: bnl54@yandex.ru).

Получено 12.03.2013