



УДК 620.169.1

*А.О. Григорьев, А.В. Емельянов,
Ю.Э. Хангу, В.А. Шерстнев*

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

*A.O. Grigoriev, A.V. Emelianov,
Yu.E. Khangu, V.A. Sherstnev*

RESIDUAL RESOURCE CALCULATION OF HEAT RESISTING STILS DURABILITY

Предлагается новый экспресс-метод расчета остаточного ресурса прочности жаропрочных сталей после их длительной эксплуатации при повышенных температурах в различных коррозионных средах. Методика расчета базируется на фундаментальной температурно-временной зависимости прочности материала в исходном состоянии и приближенной интегральной оценке характеристик прочности «отработанного» материала, путем проведения относительно кратковременных испытаний на длительную прочность.

РЕСУРС. НАПРЯЖЕНИЕ. ДЕФОРМАЦИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ. ВЯЗКОСТЬ.

The paper is devoted for remainder solidity resurs express-method calculation of heat stability steels after their prolonged high-temperature and corrosion surrounding exploitation. The method is based on the solid time-temperature dependence for the material in inital condition.

RESURS. STRESS. CREEP STRAIN. DURABILITY. VISCOUSITY.

При длительном использовании производственного оборудования, изготовленного из жаропрочных сталей, развиваются повреждения или нарушения работоспособности отдельных его конструктивных элементов даже при отсутствии дефектов их изготовления и соблюдении правил эксплуатации. При этом существенную роль в снижении работоспособности оборудования играют длительность действия нагрузок, коррозионная активность технологических сред, высокие температуры и скорости технологических потоков, радиационное облучение и другие факторы.

При реализации различных этапов контроля оборудования наиболее трудоемкой является оценка остаточного ресурса конструктивных элементов. Традиционный метод контроля состоит в доведении образца, вырезанного из элемента конструкции, до разрушения под действием постоянных растягивающей нагрузки и температуры в течение относительно продолжительного времени, обычно 10^3 – 10^4 часов. Далее по результатам испытаний строят параметрические зависимости,

позволяющие с определенной вероятностью прогнозировать остаточный ресурс длительной прочности отработанного материала. Такой метод оценки экономически невыгоден (а иногда и практически невозможен) поскольку требует остановки технологического оборудования на длительный период проведения испытаний.

Цель исследования — построение оптимальной параметрической функции по результатам относительно кратковременных испытаний трехпяти образцов на длительную прочность при некотором фиксированном напряжении в течение 10–50 часов, т. е. так называемого экспресс-метода.

В качестве исходных соотношений принимаются:

уравнение состояния материала Ньютона (уравнение вязкой жидкости)

$$\epsilon_c = \frac{\sigma}{\eta}; \quad (1)$$

где ϵ_c — скорость вязкой деформации (деформации ползучести); σ — условное напряжение; η — коэффициент линейной вязкости;

нелинейная зависимость коэффициента вязкости от температуры $T(K)$ и напряжения с использованием физических констант материала

$$\eta = \eta^* e^{\frac{U_0 - m\sigma}{kT}}, \quad (2)$$

где η^* — эффективная вязкость; U_0 — начальная энергия активации процесса разрушения; m^* — структурный параметр (элементарный объем); k — постоянная Больцмана ($1,381 \cdot 10^{-23}$ Нм·град $^{-1}$).

С учетом (2) выражение (1) для скорости ползучести принимает следующий вид:

$$\dot{\epsilon}_c = \frac{\sigma}{\eta^*} e^{\frac{U_0 - m\sigma}{kT}}. \quad (3)$$

Переход от ползучести к длительной прочности материала может быть сделан на основе некоторого критерия длительной прочности, отражающего процесс статической усталости материала в виде связи деформации ползучести (или ее скорости) и долговечности (времени до разрушения). Допуская, что оба эти процесса идут согласованно, представим критерий длительной прочности в виде

$$\int_0^t \dot{\epsilon}_c(t) dt = \epsilon_{c\text{пред}}, \quad (4)$$

где t — долговечность; $\epsilon_{c\text{пред}}(t)$ — предельная вязкая деформация как функция времени, характеризующая длительную прочность материала.

Очевидно, что на установившемся участке ползучести $\dot{\epsilon}_c(t) = \text{const}(t)$ и условие (4) принимает наиболее простой вид [1, 2]

$$\dot{\epsilon}_c(t) = \epsilon_{c\text{пред}} = \text{const}. \quad (5)$$

Здесь через $\epsilon_{c\text{пред}}$ обозначена предельная деформация ползучести — характеристика длительной прочности материала.

Тогда расчетная формула для долговечности оказывается следующей:

$$t = \frac{\eta^* \epsilon_{c\text{пред}}}{\sigma} e^{\frac{U_0 - m\sigma}{kT}},$$

или

$$t = \frac{\eta^* \epsilon}{\sigma} e^{\frac{U_0 - m\sigma}{kT}}, \quad (6)$$

где $\eta^* \epsilon = \eta^* \epsilon_{c\text{пред}}$ — параметр, пропорциональный эффективному коэффициенту вязкости.

Можно убедиться, что при не очень малых напряжениях расчет по (6) приводит к величинам долговечности, мало отличающимся от получаемых по известной формуле Журкова [2]

$$t = t_0^* e^{\frac{U_0 - m\sigma}{kT}}.$$

Здесь $t_0^* = 10^{-13}$ имеет смысл периода тепловых колебаний атомов; γ — структурный параметр.

В отличие от последней формулы, выражение (6) предсказывает неограниченную долговечность материала при нулевом напряжении.

При $T(K) = \text{const}(t)$ (6) и (3) принимают следующий вид:

$$t = \frac{\eta_\epsilon^0}{\sigma} e^{\frac{\sigma}{m}}; \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon}_c = \frac{\sigma}{\eta_0^0} e^{\frac{\sigma}{m}}. \quad (8)$$

В них использованы постоянные материала

$$\eta_\epsilon^0 = \eta_\epsilon^* e^{\frac{U_0}{kT}}; \quad \eta_0^0 = \frac{\eta_\epsilon^0}{\epsilon_{c\text{пред}}}; \quad m = \frac{kT}{m^*} \quad (9)$$

(η_0^0 — условная вязкость; η_ϵ^0 — параметр, пропорциональный условной вязкости; оба этих параметра зависят от температуры).

Логарифмируя обе части (7) и (8), получим

$$\ln \frac{t}{t_0} = -\frac{\sigma}{m} + \ln \frac{\eta_\epsilon^0}{\sigma}, \quad \ln \frac{\dot{\epsilon}_c}{\epsilon_{c,0}} = \frac{\sigma}{m} + \ln \frac{\sigma}{\eta_0^0}.$$

Здесь $t_0 = 1$ ч, $\epsilon_{c,0} = 1/c$ — размерные множители, а m (в соответствии с последней формулой) приобретает смысл модуля скорости деформации, так как характеризует наклон линейного участка временной зависимости прочности в координатах $\sigma - \lg \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_{c,0}} \right)$.

Далее предполагаем, что длительная эксплуатация материала оборудования под действием напряжений, высокой температуры и других факторов сопровождается изменением только его постоянных в исходном уравнении. Их определение возможно в результате относительно кратковременных испытаний на длительную прочность контрольных образцов, вырезанных из «отработанного» изделия. В этом состоит суть рассматриваемого подхода к решению поставленной задачи.

Отметим, что предлагаемый ниже метод расчета построен на учете лишь стадии установившейся ползучести материала. Тем самым предполагается, что именно эта стадия является решающим фактором в определении его долговечности. Следует отметить, что, усложняя расчетную модель, можно добиться учета и других особенностей деформирования или разрушения материала, повышая тем самым и точность предлагаемого метода расчета.

В дальнейшем ограничимся только длительной прочностью материала и проиллюстрируем степень достоверности предлагаемого метода расчета на конкретных примерах.

Пример 1. Элемент оборудования, изготовленный из стали 12ХМ, эксплуатировался в течение 330000 часов в газо-сырьевой среде при давлении 6 МПа и температуре 300 °С. Рассчитать остаточный ресурс длительной прочности материала оборудования при дальнейшей его эксплуатации при температуре $T = 500$ °С и сопоставить результаты расчета с данными испытаний на длительную прочность образцов отработанного металла при той же температуре.

Воспользуемся следующими осредненными результатами испытаний на длительную прочность [3] стали 12ХМ в исходном состоянии при $T = 500$ °С:

σ , МПа.....	t , час
368.....	30
353.....	100
328.....	300
299.....	1000
274.....	3000

С помощью этих данных пакетом программ *Origin 8* установили корреляционную зависимость между напряжением и десятичным логарифмом долговечности. Она оказалась следующей:

$$\sigma = 444,6 - 48,36 \lg \left(\frac{t}{t_0} \right),$$

где $t_0 = 1$ ч, σ [МПа].

Определим параметры формулы (7) для металла в исходном состоянии.

Для этого вычислим модуль скорости деформации с учетом перехода от десятичного логарифма к натуральному:

$$m = 0,43429 \cdot 48,36 = 21,002 \text{ МПа.}$$

Задаваясь произвольными величинами долговечности, с помощью корреляционной зави-

симости установим соответствующие им значения напряжений

$$\sigma(10^2) = 347,9 \text{ МПа, } \sigma(10^3) = 299,5 \text{ МПа,}$$

а по формуле

$$\eta_{\epsilon}^0(t) = t \sigma \epsilon^m$$

вычислим величину условного коэффициента вязкости. Соответственно получим

$$\eta_{\epsilon}^0(100) = 5,44 \cdot 10^{11} \text{ МПа} \cdot \text{ч}$$

и

$$\eta_{\epsilon}^0(1000) = 4,674 \cdot 10^{11} \text{ МПа} \cdot \text{ч.}$$

Среднее значение коэффициента равно $\eta_{\epsilon}^0(100) = 5,057 \cdot 10^{11} \text{ МПа} \cdot \text{ч}$.

Расчетная зависимость (1) для исходного металла представлена на рис. 1.

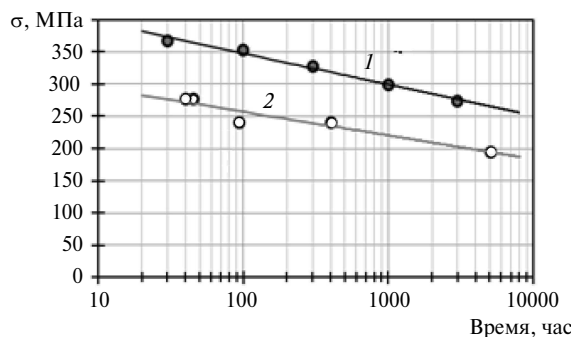


Рис. 1. Кривые длительной прочности и экспериментальные данные испытаний стали 12ХМ при температуре 500 °С:

1 — материал в исходном состоянии; 2 — материал после эксплуатации; — — — расчетные кривые, ●, ○ — экспериментальные точки

Для экспериментального определения остаточного ресурса отработанного металла из изделия был вырезан темплет и изготовлены образцы в соответствии с РД РТМ 38.14.006–86. Образцы испытывались на длительную прочность по ГОСТ 10145–81 на рычажных установках, включающих нагружающее, нагревающее и управляющее устройства*.

Образец с четырьмя закрепленными на его рабочей части термопарами предварительно помещался в печь, после чего устанавливался в захватах испытательной установки. Время нагрева

* Испытания проводились в НИЛ «Политехтест», в испытаниях принимал участие В.В. Кобец

до заданной температуры составляло от двух до трех часов, время выдержки — не менее 1 часа.

Выход на заданную установившуюся температуру для каждого процесса испытаний осуществлялся в соответствии с необходимым темпом при программном управлении. Стабилизация температуры на образце в установившемся режиме с допустимой точностью $\pm 3^\circ\text{C}$ производилась в автоматическом режиме с использованием ПИД-регулирования. Параметры регулятора выставлялись перед каждым испытанием в функции от заданной температуры. Практически в процессе испытаний температурные отклонения составили не более $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Контроль времени испытаний и температурного режима осуществлялся автоматикой испытательного комплекса.

Термопары поверялись по ГОСТ 8.338–78, силовая часть нагружающих устройств тарировалась с помощью динамометра. Данные о процессах регулирования поступали и обрабатывались на операторском компьютере системой SCADA, предоставляющей графический интерфейс управления испытаниями и ведущей непрерывное протоколирование (запись) оперативных величин.

Результаты испытаний также представлены на рис. 1 в виде отдельных точек. Все экспериментальные точки расположены ниже кривой I , отвечающей исходному состоянию, что позволяет предположить наличие повреждений в отработанном металле. Обработка результатов испытаний с помощью того же пакета программ приводит к следующей зависимости:

$$\sigma = 330 - 36,51 \lg(t/t_0).$$

Воспользуемся приведенными корреляционными зависимостями для предварительной оценки остаточного ресурса. Вычислим отношения условных пределов длительной прочности σ_t^T для отработанного и исходного материалов. Для принятых баз испытаний (t равно 30, 10^2 , 10^3 и $5 \cdot 10^3$ часов) эти отношения оказались соответственно следующими: 0,74; 0,739; 0,737 и 0,734. Это косвенно характеризует степень повреждения материала на различных этапах выдержки образцов под нагрузкой и практически свидетельствует о независимости относительного остаточного ресурса от времени испытаний.

Дальнейшие шаги по расчету остаточного ресурса связаны с применением формулы (7).

Вычисленные на базе испытаний 30 часов постоянные формулы оказались следующими:

$$m = 0,74 \cdot 21,002 = 15,54 \text{ МПа};$$

$$\eta_e^0 = 0,74 \cdot 5,057 \cdot 10^{11} = 3,742 \cdot 10^{11} \text{ МПа}\cdot\text{ч}.$$

На рис. 1 дано сопоставление экспериментальных данных испытаний отработанного материала с результатами расчета по (7) при использовании скорректированных коэффициентов (светлые точки и кривая 2). Нетрудно убедиться: опытные точки располагаются вблизи прогнозируемой кривой, что свидетельствует о возможном применении предлагаемой методики определения остаточного ресурса длительной прочности для стали 12ХМ.

Пример 2. В результате оцифровки (с помощью программы GetDataGraphDigitizer) опубликованных в [4] данных испытаний на длительную прочность стали 20ХМФЛ при $T = 540^\circ\text{C}$ получены следующие результаты:

корреляционное уравнение для основного металла

$$\sigma = 430,9 - 67,19 \lg\left(\frac{t}{t_0}\right);$$

численные величины долговечности при различных напряжениях отработанного металла после эксплуатации его в течение $1,08 \cdot 10^5$ часов, а именно:

σ , МПа.....	t , час
252,4.....	1,08
178,2.....	10,6
172,5.....	107,9
141,4.....	1201
136,9.....	244,8
123,0.....	6883
114,4.....	2257
104,2.....	6938

Требуется выполнить расчет остаточного ресурса длительной прочности исследованной стали и сопоставить его с этими результатами.

Приведем результаты основных этапов расчета.

Постоянные формулы (7) для основного металла оказались следующими:

$$m = 29,18 \text{ МПа}, \quad \eta_e^0 = 6,801 \cdot 10^2 \text{ МПа}\cdot\text{ч}.$$

На рис. 2 показана зависимость I длительной прочности стали в исходном состоянии в соответствии с этой формулой.

Воспользовавшись теми же данными и соответствующим корреляционным уравнением

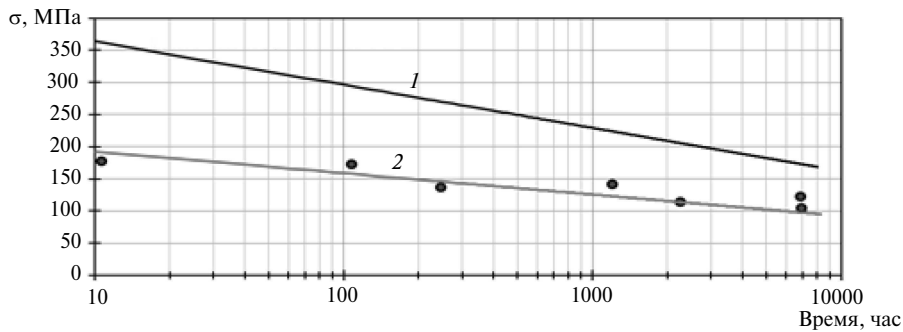


Рис. 2. Кривые длительной прочности и экспериментальные данные испытаний стали 20ХМФЛ при температуре 540 °С: 1 — материал в исходном состоянии; 2 — после эксплуатации; ● — экспериментальные точки

для вычисления отношения условных пределов длительной прочности σ_t^T , отвечающих результатам испытаний в течение $t = 10$ ч, получили следующее:

$$(196,5/363,7) = 0,54.$$

Скорректированные с помощью этого коэффициента постоянные формулы (7) для отработанного металла составили

$$m = 15,757 \text{ МПа}, \eta_e^0 = 3,7 \cdot 10^2 \text{ МПа}\cdot\text{ч},$$

что позволило получить и искомую расчетную кривую (2 на рис.2).

Нетрудно видеть: экспериментальные точки для отработанного металла колеблются вблизи расчетной кривой, что подтверждает возможность использования предлагаемого метода прогнозирования остаточной долговечности и для стали 20ХМФЛ.

В рассмотренных примерах предполагалось, что для расчета остаточного ресурса отработанного материала при дальнейшей эксплуатации в условиях заданной температуры необходимо располагать кривой длительной прочности исходного материала при той же температуре. Покажем, что с помощью формулы (6) можно произвести перерасчет данных испытаний на длительную прочность при любой температуре на требуемую (для которой определяется ресурс) с использованием уже трех констант материала — U_0 , m^* и η_e^0 . При этом следует допускать возможность применения этой формулы в рассматриваемом диапазоне изменения температур.

Пример 3. Пользуясь данными испытаний на длительную прочность [3] стали 08Х18Н10Т при $T = 550$ °С, построить кривую длительной прочности для этой же стали при $T = 600$ °С и сравнить ее с опытными данными при аналогичной

температуре, взятыми из того же литературного источника.

По данным из [3] установим корреляционную зависимость при $T = 550$ °С:

$$\sigma = 407,2 - 56,21 \lg(t/t).$$

Далее вычислим модуль скорости деформации и величину условного коэффициента вязкости

$$m = 24,41 \text{ МПа}, \eta_e^0 = 4,677 \cdot 10^9 \text{ МПа}\cdot\text{ч}$$

и с помощью последней формулы (9) определим постоянную формулы (6):

$$m^* = \frac{1,381 \cdot 10^{-17} \cdot 823}{24,41} = \frac{1,137 \cdot 10^{-14}}{24,41} = 4,658 \cdot 10^{-16} \text{ М}^3.$$

Величину начальной энергии активации определим, воспользовавшись формулой Журкова. Для этого составим уравнение

$$U_0 - m^* \sigma_{\text{пред}} = 0,$$

где предельное напряжение $\sigma_{\text{пред}}$ вычислим, полагая в корреляционной зависимости $t = t_0 = 10^{-13} \text{ с} = 2,778 \cdot 10^{-17} \text{ ч}$. В результате получим

$$\sigma_{\text{пред}} = 407,2 - 56,21 \lg(2,778 \cdot 10^{-17}) = 1338 \text{ МПа}.$$

Величина искомой постоянной равна

$$U_0 = \sigma_{\text{пред}} m^* = 1338 \cdot 4,658 \cdot 10^{-16} = 6,232 \cdot 10^{-13} \text{ МН}\cdot\text{м}.$$

Из второй формулы (9) найдем еще одну постоянную:

$$\eta_e^* = \eta_e^0 e^{-\frac{U_0}{kT}} = 4,677 \cdot 10^9 e^{-\left(\frac{6,232 \cdot 10^{-13}}{1,137} \cdot 10^{-14}\right)} = 7,385 \cdot 10^{-15} \text{ МПа}\cdot\text{ч}.$$

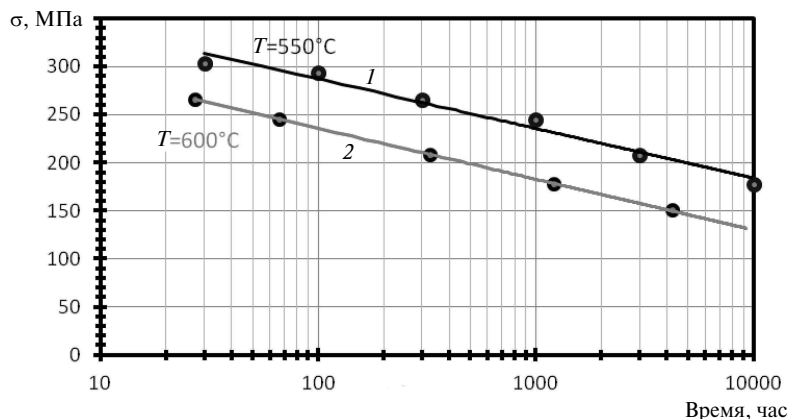


Рис. 3. Кривые длительной прочности и экспериментальные данные испытаний стали O8X18N10T при различных температурах: ----- — расчетные кривые; ● — экспериментальные точки

Подставляя температуру $T = 873 \text{ }^\circ\text{K}$ и вычисленные выше постоянные в (6), приходим к искомой зависимости длительной прочности (кривая 2 на рис. 3)

Данные испытаний на длительную прочность при $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ располагаются практически вблизи расчетной кривой, что свидетельствует о применимости (6) при разных температурах [1].

Предложен новый экспресс-метод расчета остаточного ресурса длительной прочности жаропрочных сталей после их длительной эксплуатации при повышенных температурах и в различных коррозионных средах.

Методика расчета базируется на фундаментальной температурно-временной зави-

симости прочности основного металла и приближенной интегральной оценке остаточного ресурса отработанного материала, для чего требуется проведение относительно ограниченных (по количеству образцов и времени испытаний) опытов на длительную прочность.

Предложенный метод расчета остаточного ресурса отличается простотой реализации на практике и получил подтверждение при испытании двух марок стали при температурах $500\text{--}540 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение не более 2000 часов. В соответствии с рекомендациями ГОСТ 10145–81 возможно прогнозирование остаточного ресурса длительной прочности исследованных сталей на срок до 30000 часов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В.Р. Регель, А.И. Слущкер, Э.К. Томашевский.— М., 1974.— С. 60–61, 495–506.
2. Хангу, Э. Длительное сопротивление стекло-текстолита при растяжении [Текст] / Э. Хангу.— Труды ЛПИ.— № 314.— Л., 1970.— С. 205–207.
3. Нормы расчета на прочность оборудования

- и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-8–002–86) [Текст] / Госатомэнергонадзор СССР.— М.: Энергоатомиздат, 1989.— С. 186–190.
4. Аршакуни, А.М. Закономерности ползучести и длительной прочности [Текст]: Справочник / А.Л. Аршакуни, А.М. Локошенко, В.Н. Киселевский [и др.].— М.: Машиностроение, 1983.— С. 31.

REFERENCES

1. Reguel, V.R. Kinetic nature of bodies solidity [Text] / V.R. Reguel, A.I. Sloutsker, E.K. Thomashevsky.— М., 1974.— P. 60–61, 495–506.
2. Khangu, Y.E. Prolonged resistance of glass fiber plastics during tension. L. [Text] / Y.E. Khangu.— Works of LPI.— № 314.— 1970.— P. 205–207.

3. Equipment and pipe-lines of power engineering regulations [Text] / Gosatomenergonadzor SSSR. М.: Energoatomizdat, 1989.— P. 186–190.
4. Arshakini A.L., Lokoshenko A.M., Kiselevskiy [et all.] Creep and durability of materials [Text]: Handbook.— М.: Mechanical engineering, 1983.— P. 31.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ /AUTHORS

ГРИГОРЬЕВ Александр Олегович — аспирант кафедры систем и технологического управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; e-mail: alexandr.o.grigoriev@gmail.com

GRIGORIEV Alessandr O. — St.Petersburg State Politechnical Universiti, 29 Politeknicheskaya St., St.-Petersburg, 195251, Russia; e-mail: alexandr.o.grigoriev@gmail.com

ЕМЕЛЬЯНОВ Антон Владимирович — магистрант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; e-mail: Visher90@mail.ru

EMELIANOV Anton V. — St.Petersburg State Politechnical Universiti, 29 Politeknicheskaya St., St.-Petersburg, 195251, Russia; e-mail: Visher90@mail.ru

ХАНГУ Юрий Эльмарович — кандидат технических наук доцент кафедры сопротивления материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; e-mail: Khangu2010@yandex.ru

KHANGU Yuriy E. — St.Petersburg State Politechnical Universiti, 29 Politeknicheskaya St., St.-Petersburg, 195251, Russia; e-mail: Khangu2010@yandex.ru

ШЕРСТНЕВ Владимир Алексеевич — кандидат технических наук профессор кафедры сопротивления материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; e-mail: Shervall@yandex.ru

SHERSTNEV Vladimir A. — St.Petersburg State Politechnical Universiti, 29 Politeknicheskaya St., St.-Petersburg, 195251, Russia; e-mail: Shervall@yandex.ru