

УДК 62.135

Н. Н. ГРИШИН, канд. техн. наук; первый заместитель главного конструктор паровых и газовых турбин ОАО «Турбоатом», Харьков;
А. Н. ГУБСКИЙ, начальник сектора ОАО «Турбоатом», Харьков;
С. А. ПАЛЬКОВ, начальник сектора ОАО «Турбоатом», Харьков;
И. А. ПАЛЬКОВ, ведущий инженер-конструктор ОАО «Турбоатом», Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЯВЛЕНИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫСОКОНАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Представлена численная реализация методики оценки влияния явлений ползучести на напряженно-деформированное состояние высоконапряженных элементов паровой турбины. Рассмотрена технология обработки имеющихся в литературных источниках экспериментальных кривых ползучести. Технология основана на методе наименьших квадратов. В качестве модели ползучести выбрана модифицированная временная модель ползучести с упрочнением, принадлежащая к методам неявной ползучести и характеризующаяся устойчивостью, точностью и быстротой решения. Проведено сравнение экспериментальных кривых ползучести и кривых, полученных аналитическим путем. Выполнен анализ влияния ползучести на напряженно-деформированное состояние элементов паровых турбин. Результаты численного исследования показаны на фоне изменения напряжений и деформаций со временем в замковом соединении рабочих лопаток с диском и во внутреннем корпусе паровой турбины К-500-240.

Ключевые слова: необратимая деформация, ползучесть, метод конечных элементов, метод наименьших квадратов, экспериментальная кривая, модифицированная временная модель с упрочнением, двумерная аппроксимация, замковое соединения рабочих лопаток, внутренний корпус.

Введение

При длительном нагружении деталей турбин, эксплуатация которых протекает при повышенных температурах, возникают необратимые деформации, в результате чего напряжения могут изменяться во времени. Это явление изменения во времени деформаций и напряжений, возникших при нагружении, называют ползучестью.

В практике эксплуатации турбомашин известно много случаев, когда за счет ползучести деформации деталей достигали таких величин, при которых нарушались условия нормальной эксплуатации агрегатов. Так, например, вследствие ползучести диска 1-й ступени ротора среднего давления турбины мощностью 500 МВт произошел отрыв части обода диска с 6-ю лопатками [1].

За счет уменьшения со временем напряжений наступает постепенное ослабление плотности соединения деталей, скрепленных при помощи упругого натяга. Плотность болтового соединения фланцев внутреннего корпуса паровой турбины К-500-240, работающих при высоких температурах, с течением времени уменьшается, что может привести к «пропариванию» фланцев.

Если разрушение детали происходит по истечении значительного промежутка времени после приложения нагрузки, то напряжения и деформации в этот момент могут сильно отличаться от значений их при нагружении. Поэтому при анализе разрушения необходимо учитывать перераспределение напряжений за счет ползучести материала [2].

В последние пятнадцать лет происходит интенсивное развитие численных методов анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) твердых тел в условиях ползучести. Накопленный в этой области опыт свидетельствует о том, что

© Н.Н. Гришин, А.Н. Губский, С.А. Пальков, И.А. Пальков, 2014

решение задач ползучести связано с большими трудностями в сравнении с анализом упругопластического поведения, поскольку определяющие уравнения ползучести являются обычно более сложными.

О сложности аналитического описания характеристик ползучести можно судить по классическому графическому изображению изменения деформации ползучести с течением времени t (рис. 1), полученному по результатам испытаний в условиях постоянного напряжения σ и температуры T .

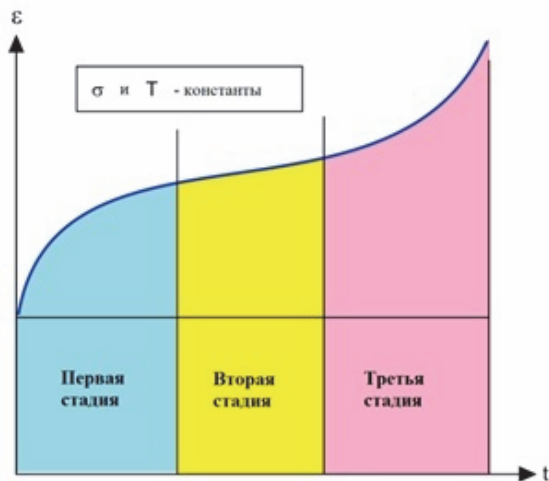


Рис. 1 – Характерный вид кривой ползучести

Единственным широко используемым методом решения краевых задач деформирования является метод конечных элементов (МКЭ) [3]. Приложение МКЭ к задачам ползучести осуществляется путем пошагового интегрирования уравнений краевой задачи. Оно затруднено высокой нелинейностью получаемых зависимостей. Стабильность и точность МКЭ в этом случае существенно зависит от выбора временного шага и метода интегрирования.

В качестве источника информации о сопротивлении ползучести используются кривые ползучести $\varepsilon = f(t, \sigma, T)$, полученные

на гладких цилиндрических образцах в условиях постоянной растягивающей нагрузки P и температуры T .

В большинстве программных комплексов, основанных на МКЭ, представлена возможность моделирования первых двух стадий ползучести (первичная и вторичная). Третья стадия обычно не подвергается расчету, поскольку подразумевает приближение разрушения.

В данной работе в качестве модели для описания явлений ползучести выбрана модифицированная временная модель с упрочнением.

$$\varepsilon_{cr} = f(t, \sigma, T, C_1, C_2, C_3, C_4),$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – коэффициенты.

Модифицированная временная модель ползучести с упрочнением принадлежит к методам неявной ползучести и характеризуется устойчивостью, точностью и быстротой решения.

Перед использованием какого-либо уравнения необходимо определять значения его коэффициентов, характеризующих применяемый материал. Следует отметить, что набор коэффициентов для всей области экспериментальных данных зависит не только от температуры, но и от уровня напряжений и длительности испытания. В связи с этим возникает необходимость проведения двумерной аппроксимации. Такая операция выполнима с помощью математического метода наименьших квадратов [4], основанного на минимизации суммы квадратов некоторых функций от искомым переменных

$$f_i(x) = y_i; \quad i = 1 \dots n,$$

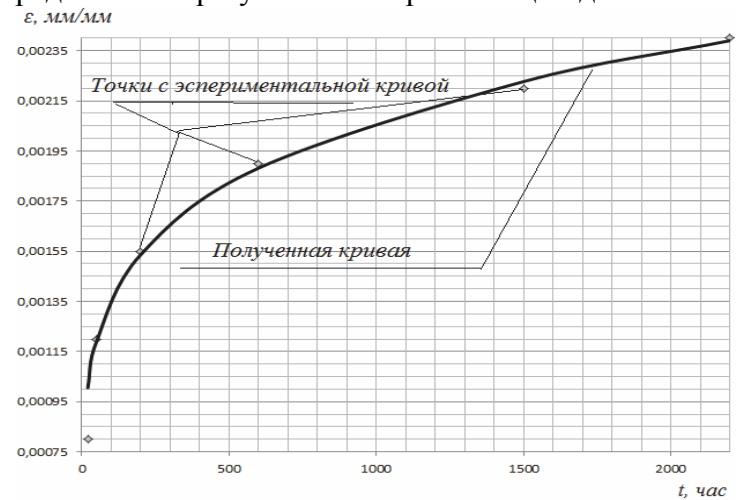
где $f_i(x)$ – некоторые функции; y_i – некоторые известные значения. Под известным значением будем понимать значение величины деформации ползучести из экспериментальной кривой.

Итак, суть метода состоит в нахождении таких значений x (в данном случае коэффициентов C_1, C_2, C_3, C_4), при которых минимизируется сумма квадратов отклонений e_i

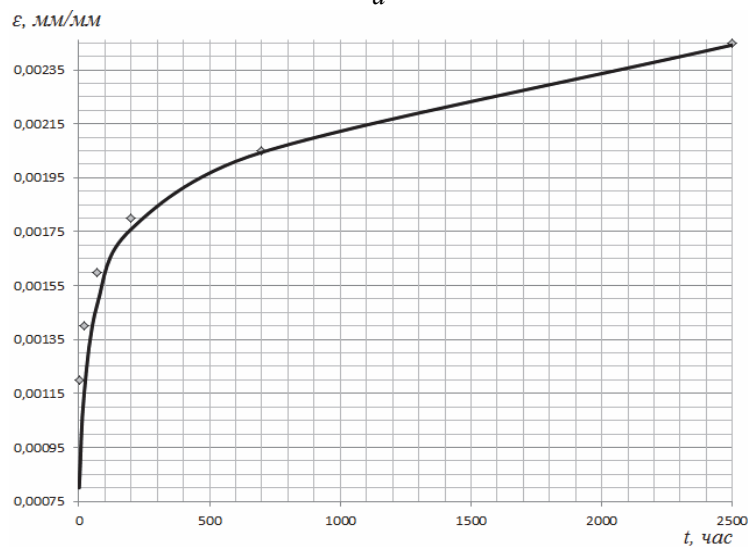
$$\sum_i e_i^2 = \sum_i (y_i - f_i(C_1, C_2, C_3, C_4))^2 \rightarrow \min_{C_1, C_2, C_3, C_4}; \quad i=1 \dots n,$$

где n – количество точек на экспериментальной кривой.

На рис. 2 представлены результаты аппроксимации для стали 20Х3МВФА.



а



б

Рис. 2 – Аппроксимация экспериментальных кривых для стали 20Х3МВФ:
а – при температуре 500 °С; б – при температуре 550 °С

На рис. 3 наглядно представлены результаты по расчету напряженного состояния замкового соединения лопаток 1-й ступени РСД т. К-500-240.

Показано, что с течением времени происходит перераспределение напряжений в конструкции замкового соединения, в частности грибка диска. Наблюдается постепенное понижение абсолютных значений сжимающих напряжений – с –81 МПа до –51 МПа, и повышение положительных растягивающих напряжений – с 300 МПа до 315,2 МПа.

Перераспределение нагрузок и напряжений также показано зонами, где напряжения превышают предел ползучести. В момент времени $t = 10000$ ч – это единичная зона у галтельного перехода верхней опорной площадки, где $\sigma_{y(\max)} = 304,5 \text{ МПа} > [\sigma_{\text{пл}}]^{10^4} = 250 \text{ МПа}$. В момент времени $t = 100000$ ч – такие зоны присутствуют у галтельных переходов всех опорных площадок, а также в отверстиях под фиксирующие штифты, где $\sigma_{y(\max)} = 315,2 \text{ МПа} > [\sigma_{\text{пл}}]^{10^5} = 120 \text{ МПа}$.

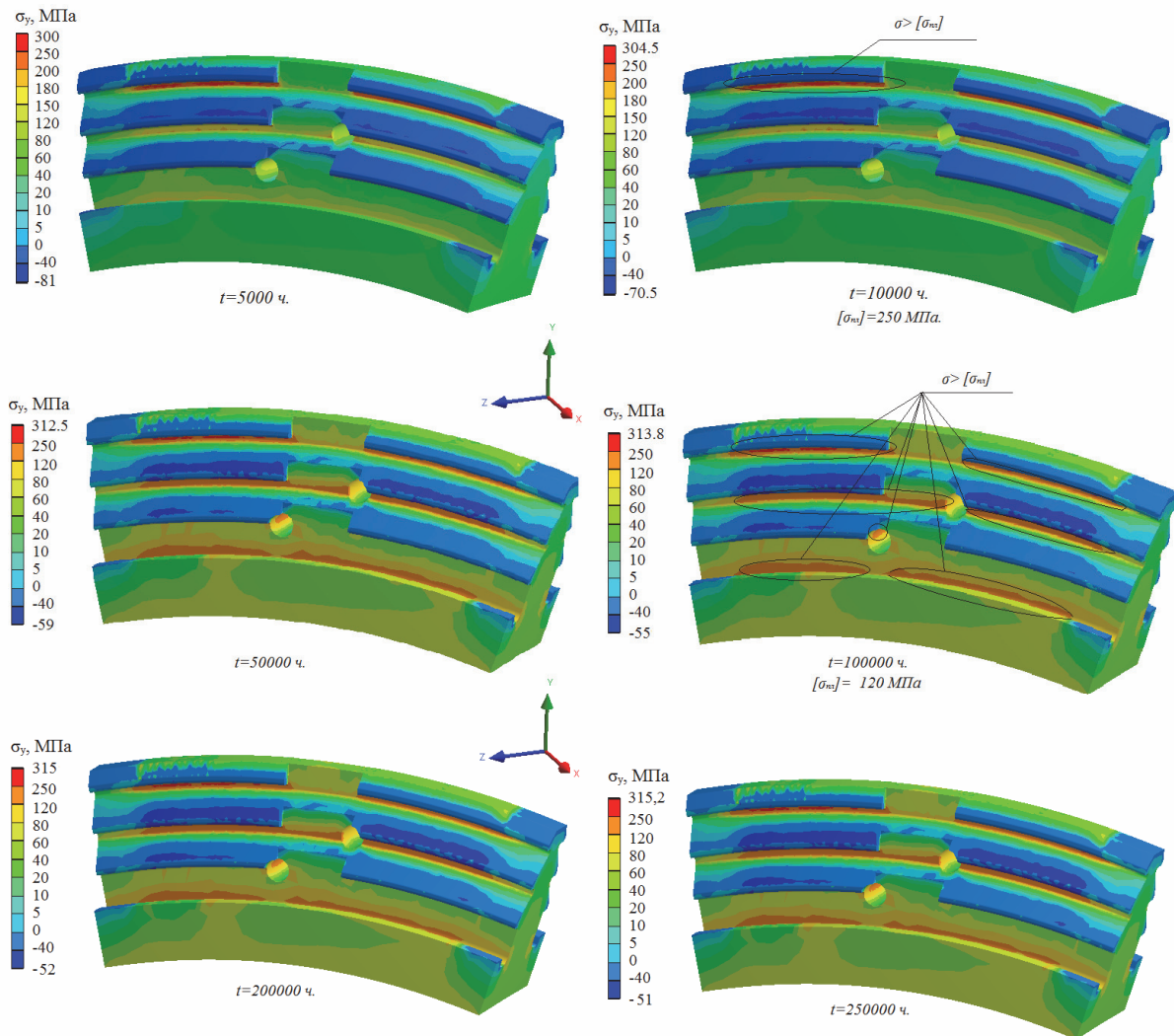


Рис. 3 – Изменение радиальных напряжений при ползучести в конструкции грибка диска 1-й ст. РСД т. К-500-240

На рис. 4 приведены результаты решения задачи определения НДС внутреннего корпуса с учетом влияния ползучести материала. Показано распределение контактных давлений на уплотнительной поверхности фланцевого разъема корпуса в различные моменты времени.

Показано, что уже при времени работы $t = 300$ ч происходит значительное перераспределение контактных давлений и, в первую очередь, на внутреннем уплотняющем пояске горизонтального разъема, что не отражается в современных документах, регламентирующих обеспечение плотности горизонтального разъема и что

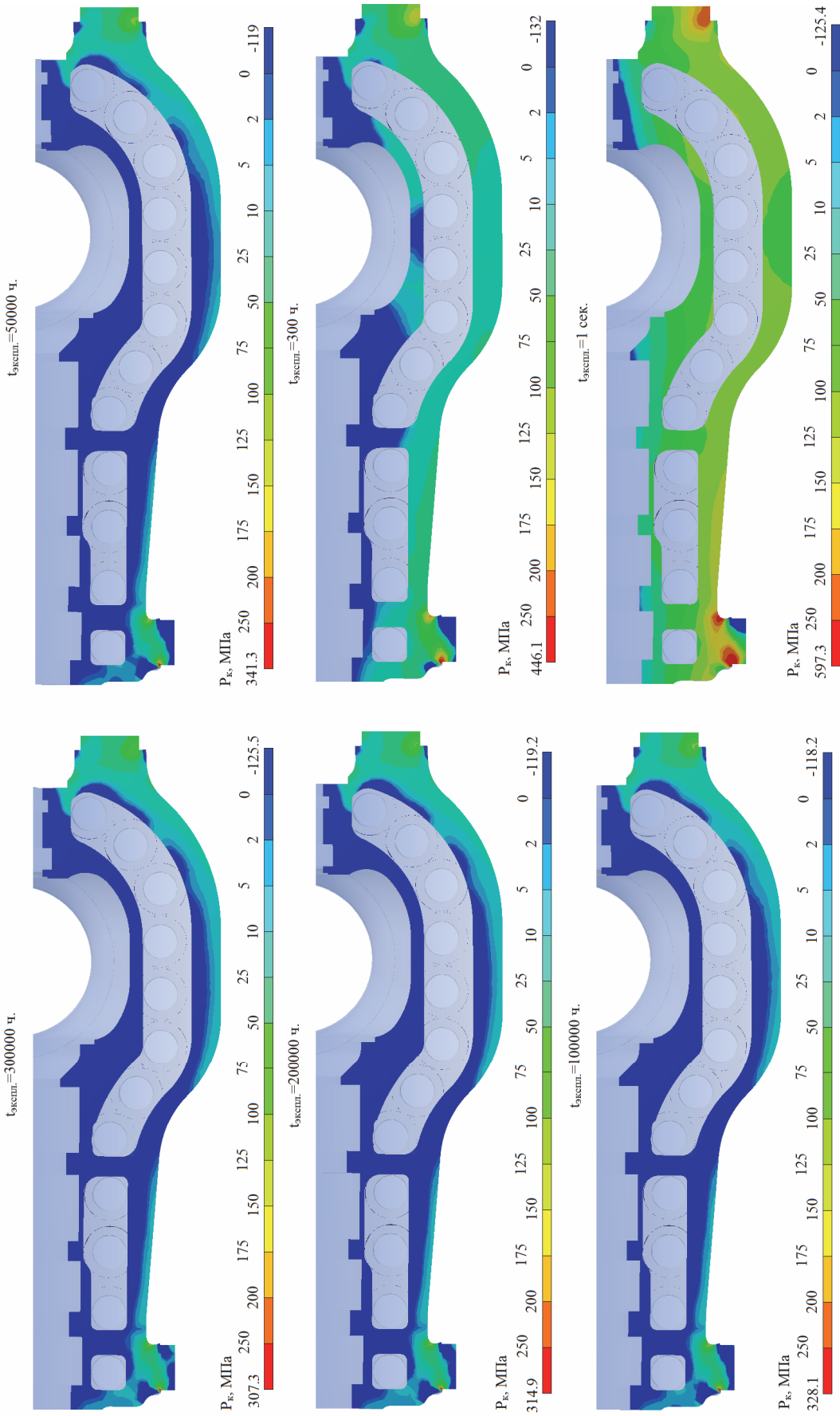


Рис. 4 – Изменение контактных давлений при ползуности во фланцевом соединении внутреннего корпуса

требует дополнительного учета. При этом, начиная со времени $t = 50000$ ч картина распределения контактных давлений не меняется.

Согласно ГОСТ 24278-91 гарантированная плотность фланцевого соединения должна обеспечиваться с момента затяжки до планового ремонта через $t = 40000$ ч, а в последнее время заказчик требует все 50000 ч. Данный факт является в определенном смысле положительным, поскольку во время планового ремонта уплотнительные поверхности уже окончательно сдеформированных фланцев корпуса шабруют и выбирают зазор. Таким образом, более высокая, по сравнению с фланцем, податливость шпилек и практически окончательно сдеформированные фланцы обеспечивают сравнительно стабильную нагрузку при деформации корпуса и удовлетворительную уплотнительную способность.

Выводы

Имеющиеся в практике случаи поломок и повреждений высоконапряженных элементов паровых турбин привели к необходимости учета влияния явлений ползучести на общее напряженно-деформированное состояние последних.

Стремительное развитие численных методик и их компьютерная реализация сделали возможным приступить к решению задач ползучести для сложных трехмерных моделей, что, в свою очередь, ведет к увеличению точности расчетов и надежности проектируемых изделий.

Представленная в данной работе технология обработки и аппроксимации экспериментальных кривых ползучести достаточно быстро позволяет получать недостающие величины коэффициентов уравнения модели ползучести.

Приведены результаты численного исследования напряженно-деформированного состояния элементов паровой турбины К-500-240 при ползучести. При рассмотрении напряженного состояния замкового соединения рабочих лопаток 1-й ступени ротора среднего давления показано, что имеют место локальные зоны напряжений, величина которых по своему численному значению оказалась выше предела ползучести материала ротора. Это, вероятно, и стало причиной появления микропустот и микротрещин, что и привели к поломке турбины с вылетом части обода диска с лопатками. Также приведены результаты решения задачи об НДС внутреннего корпуса турбины К-500-240 при ползучести. Показано, что со временем плотность уплотнительной поверхности фланцев внутреннего корпуса понижается, что в итоге приведет к «пропариванию» фланцев. Однако с момента времени $t = 50000$ ч картина распределения контактных давлений практически не меняется.

Список литературы: 1. Методические указания по расследованию причин повреждений деталей роторов паровых турбин электростанций [Текст]: РД 153-34.1-17.424-2001. – М.: ОАО «ВТИ», 2002. – 82 с. 2. *Малинин, Н. Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести [Текст]: учеб. для вузов / Н. Н. Малинин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с. 3. *Зенкевич, О. К.* Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 4. *Сизиков, В. С.* Устойчивые методы обработки результатов измерений [Текст] / В. С. Сизиков. – Санкт-Петербург: Специальная литература, 1999. – 240 с.

Bibliography (transliterated): 1. *RD 153-34.1-17.424-2001. Metodicheskie ukazaniya po rassledovaniju prichin povrezhdenij detalej rotorov parovyh turbin jelektrostantsij.* Moscow: ОАО «ВТИ», 2002. Print. 2. *Malinin, N. N. Prikladnaja teorija plastichnosti i polzuchesti.* Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 400 s. 3. *Zenkevich, O. K. Metod konechnyh jelementov v tehnikе.* Moscow: Mir, 1975. Print. 4. *Sizikov, V. S. Ustoichivye metody obrabotki rezul'tatov izmerenij.* St. Petersburg: Special'naja literatura, 1999. Print.

Поступила (received) 17.02.2014