УДК 539.2

# СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ УЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

**Белов А.В., Неумоина Н.Г., Поливанов А.А., Попов А.Г.**

*Камышинский технологический институт, филиал Волгоградского государственного технического университета, Камышин, e-mail: popov@kti.ru*

Проведен сопоставительный расчетный анализ феноменологических моделей воздействия водорода высоких параметров на тонкостенные многослойные стальные пластины, работающие в условиях силовых и тепловых нагрузок ($T = 500\,°C$), а также при воздействии водорода давлением от 5 до 10 МПа. Такие условия являются достаточно типичными для работы энергетического оборудования, связанного с использованием водородосодержащих сред. Определены области использования этих моделей, приводятся практические рекомендации по использованию этих моделей. Проведен расчет времени до разрушения пластины вследствие высокотемпературной ползучести и водородной коррозии и отклонения результатов от принятого эталонного значения. Для полученных результатов расчета посчитано влияние двух основных параметров – параметра λ, являющегося мерой скорости химического взаимодействия водорода с конструкцией, а также трех характерных параметров химического взаимодействия водорода с материалом конструкции $\mu_0$, $\mu_П$, $\mu_{КР}$. В конце статьи приведены рекомендации по использованию разработанной авторами методики расчета.

**Ключевые слова: многослойные стальные пластины, высокотемпературная водородная коррозия, высокотемпературная ползучесть**

# COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT ACCOUNTING MODELS OF HIGH PARAMETER EFFECTS HYDROGEN ON BEARING CAPACITY OF STEEL SHELLS IN TEMPERATURE CREEP

**Belov A.V., Neumoina N.G., Polivanov A.A., Popov A.G.**

*Kamyshin Technological Institute, branch of Volgograd State Technical University, Kamyshin, e-mail: popov@kti.ru*

A comparative analysis of the current phenomenological models of the high settings hydrogen effects on multilayer thin steel plates, operating under conditions of power and heat load ($T = 500\,°C$), as well as affected by hydrogen pressure of 5 to 10 MPa. These conditions are fairly typical of the power equipment associated with the use of hydrogen-containing environments. The ranges of these models, provides practical advice on the use of these models. The calculation of the time to failure of the plate, due to high-temperature creep and hydrogen corrosion and the deviation of the results from the accepted reference value has been done. The influence of two main parameters – parameters λ, which is the rate measure of the chemical interaction of hydrogen with the construction , as well as of the three characteristic parameters of the chemical interaction of hydrogen with structural materials $\mu_0$, $\mu_P$, $\mu_{KR}$ has been calculated for the results obtained. The article provides guidance on the use of the authors' method of calculation.

**Keywords: multilayer steel plates, high temperature corrosion, high temperature creep**

На основе системного подхода авторами разработана методика решения комплексной задачи по оценке прочности и долговечности стальных оболочек вращения с учетом необратимых деформаций, повреждаемости материалов вследствие ползучести и высокотемпературной водородной коррозии. [1, 2, 5, 7]. При этом коррозионное воздействие водорода на стали в настоящее время изучено достаточно хорошо, и на эту тему имеется множество публикаций, в которых показано, что влияние водорода существенным образом сказывается на изменении вида диаграммы деформирования углеродистых сталей, при этом снижаются прочностные и пластические свойства сталей, и происходит их охрупчивание, ухудшаются длительные прочностные характеристики сталей. Таким образом, основной задачей исследователей является определение функции времени перехода механических характеристик сталей из исходного состояния в обезуглероженное. Здесь используется несколько подходов, подробно изложенных авторами в публикации [7].

## Обобщенная модель химического взаимодействия

Влияние водорода на свойства материала в данной модели представляется в виде дифференциального уравнения для параметра химического взаимодействия водорода с материалом конструкции μ, изменяющегося от $\mu_0$ до $\mu_{КР}$, принадлежащего интервалу (0; 1) и характеризующего степень поражения материала вследствие водородной коррозии [4]:

$$\frac{d\mu}{dt} = k \cdot \mu\left(1-\mu\right) \qquad (1)$$

с условиями:

$$t = 0, \quad \mu = \mu_0(p, T, \omega_C);$$
$$t = t_{инк}, \quad \mu = \mu_П(p, T, \omega_C); \qquad (2)$$
$$t = t_{кр}, \quad \mu = \mu_{КР}(p, T, \omega_C).$$

Здесь $k(p, T, \omega_C)$ – коэффициент, учитывающий влияние давления $p$, температуры $T$ и степени поврежденности $\omega_C$ на кинетику химических превращений, приводящих к деградации физико-механических свойств материала. Значения $\mu_0$, $\mu_П$ и $\mu_{КР}$ определяются по методике, изложенной в работах [3, 4].

Распределение давления по толщине пластины вычисляется [4]:

$$P_Z = \left(\sqrt{P_B}\cdot\left(1-\frac{z}{h}\right)+\sqrt{P_H}\cdot\frac{z}{h}\right)^2, \qquad (3)$$

где $z$ – плоская координата; $h$ – толщина пластины; $P_В$ – внутреннее давление; $P_Н$ – наружное давление.

### Упрощенная модель химического взаимодействия

Предполагается, что влияние водорода, контактирующего с материалом конструкций, проявляется по истечении определенного времени, называемого инкубационным периодом $t_{инк}$. После завершения инкубационного периода начинается период активных химических превращений $t_{кр}$, когда происходит интенсивное обезуглероживание материала конструкции, при этом механические свойства материалов могут существенно изменяться. По его завершении дальнейших изменений механических свойств сталей под воздействием водорода не происходит. Так как $t < t_{инк}$ изменений механических свойств материалов еще не происходит, а при $t > t_{кр}$ уже не происходит [4], то функцию (1) можно аппроксимировать трехзвенной прямой линией. В этом случае влияние водорода на свойства материала будет описываться в виде кусочно-линейного закона для параметра химического взаимодействия водорода μ, изменяющегося от 0 до 1 и характеризующего степень поражения материала вследствие водородной коррозии.

Длительность инкубационного периода, как показано в работе [4], определяется с помощью следующего соотношения:

$$t_{инк} = m\, p^{-u} \exp(B/T), \qquad (4)$$

где $p$ – парциальное давление водорода, МПа; $T$ – температура; $m$, $u$, $B$ – некоторые константы, экспериментально определяемые для различных марок стали.

$$t_{кр} = \lambda\, t_{инк}, \qquad (5)$$

где λ – параметр, являющийся мерой скорости химического взаимодействия водорода с конструкцией, показывающий, во сколько раз время до завершения периода изменений механических свойств материала отличается от продолжительности инкубационного периода, т.е. $\lambda = t_{кр}/t_{инк}$. Для стали 20 этот параметр варьируется в пределах от 5 до 10 [3, 4].

### Модель оценки кинетики движения фронта обезуглероживания

Предполагается, что воздействие водорода на материал начинается с поверхности оболочки, непосредственно контактирующей с водородосодержащей средой, и проявляется в обезуглероживании материала. Далее этот процесс распространяются в глубь конструкции с образованием области обезуглероженного материала. Поверхность, разграничивающую области материалов в исходном и обезуглероженном состоянии, будем называть фронтом обезуглероживания. Кинетика перемещения фронта обезуглероживания для пластины будет определяться следующим выражением [4]:

$$\frac{z}{h} = 1-\left[\frac{k\cdot\lambda\cdot\exp(Q/T)}{t_{фронта}\cdot p^u}\right]^{\frac{1}{2\cdot u}}, \qquad (6)$$

где $z$ – глубина обезуглероживания, отсчитываемая от поверхности контакта пластины с водородом; $t_{фронта}$ – время, для которого определяется глубина обезуглероживания.

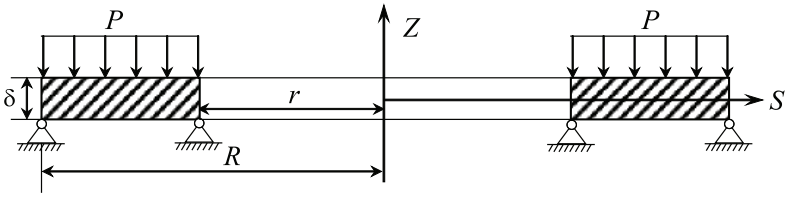
Наиболее точно процесс высокотемпературной водородной коррозии отражает обобщенная модель химического взаимодействия [4], поскольку она построена на основе анализа экспериментальных данных, и ее графическая интерпретация фактически повторяет график кинетики выделения метана, образование которого, собственно, и приводит к обезуглероживанию стали и ухудшению ее механических характеристик.

Проведем сравнительный анализ результатов расчета по обобщенной и упрощенной моделям химического взаимодействия, а также проведем исследование влияния разброса параметров обобщенной модели на результаты расчета. В качестве эталонного будем использовать результат расчета, полученный по обобщенной модели химического взаимодействия [4] с параметрами $\mu_0 = 0{,}17$; $\mu_П = 0{,}218$; $\mu_{КР} = 0{,}915$. Для других материалов данных нет. В табл. 4 результат расчета по этим параметрам выделен жирным шрифтом.

В процессе исследований будем изменять значение каждого параметра $\mu_0$; $\mu_П$; $\mu_{КР}$ при неизменных двух других и проанализируем, как это изменение влияет на время

обезуглероживания и начала процесса разрушения вследствие повреждаемости материала при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии. Кроме этого, сравним полученные результаты расчетов с аналогичными расчетами по упрощенным моделям.

В качестве объекта исследований будем использовать равномерно нагретую кольцевую пластину, находящуюся под воздействием давления водорода. Пластина изготовлена из материала сталь 20 и имеет следующие геометрические размеры: $R$ = 110 мм, $r$ = 65 мм, δ = 10 мм (рисунок).




Давление водорода осуществляется на верхнюю поверхность пластины и постоянно во времени, при этом внешний и внутренний кольцевые контуры имеют шарнирно-неподвижное опирание. Давление водорода принималось равным 5; 7,5 и 10 МПа. Выбор значений обусловлен следующими соображениями: при 5 МПа в материале пластины имеют место только мгновенные упругие деформации и деформации ползучести, а при 7,5 и 10 МПа – еще и мгновенные пластические. Все расчеты приведены для температуры 500 °С.

Константы материала в соотношениях были взяты из [4], которые для стали 20 при данных условиях нагружения принимают следующие значения:

$$k = 1{,}49\cdot10^{-5}\ (\text{МПа})^{*}u,\ \text{ч};\ u = 1{,}73;$$

$$B = 13500;\ \lambda = 1\ldots10.$$

Влияние уровня напряжений на скорость обезуглероживания в данном расчете не учитывалось, поскольку для этого требуются дополнительные исследования.

В рамках данной работы ограничимся лишь оценкой времени до локального разрушения, поскольку на этот параметр оказывают влияние все характеристики напряженно-деформированного состояния, а также степень обезуглероженности.

Результаты исследований приведены в табл. 1–4. В таблицах приведены значения времени начала процесса разрушения пластины в часах в зависимости от параметров модели. Во все случаях процесс разрушения начинается с внешней (нижней) стороны пластины в необезуглероженной зоне в точке, отстоящей от края отверстия на 20 мм.

В качестве вариантов упрощенной модели были выбраны:

А. Модель с кусочно-линейной аппроксимацией параметра химического взаимодействия водорода μ.

В. Модель со ступенчатым переходом от исходного состояния материала к обезуглероженному.

С. Модель оценки кинетики движения фронта обезуглероживания.

**Таблица 1**

Расчет по упрощенной модели $P_H$ = 5 МПа

| Вариант упрощенной модели / λ | Время до разрушения ($t_L$, ч) и отклонение результата расчета от эталонного значения (δ, %) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | | B | | C | |
| | $t_L$ | $d$ | $t_L$ | $d$ | $t_L$ | $d$ |
| 1 | 3920,2 | 13,2 % | 3397,1 | 24,8 % | 3974,2 | 12,0 % |
| 3 | 4260,5 | 5,7 % | 3946,8 | 12,6 % | 4319,9 | 4,3 % |
| 5 | 4451,3 | 1,4 % | 4221,8 | 6,5 % | 4508,1 | 0,2 % |
| 8 | 4910 | 8,7 % | 4750,0 | 5,2 % | 4980,0 | 10,3 % |
| 10 | 5680 | 25,8 % | 5510,0 | 22,0 % | 5850,0 | 29,5 % |

Как видно из таблиц, при использовании обобщенной модели наибольшее влияние на результат оказывает выбор параметра $\mu_0$ – при изменении его значения от 0,05 до 0,2 время разрушения увеличивается на 21 %, что может существенно повлиять на оценку несущей способности конструкции. Изменение параметра $\mu_П$ влияет на результат расчета значительно меньше. Так, в диапазоне изменения $\mu_П$ от 0,2 до 0,4 значение времени до разрушения изменилось всего на 7 %. Степень влияния параметра $\mu_{КР}$ на результат расчета чуть выше, чем влияние параметра $\mu_П$.

**Таблица 2**

Расчет по упрощенной модели $P_H$ = 7,5 МПа

| λ \ Вариант упрощенной модели | Время до разрушения ($t_L$, ч) и отклонение результата расчета от эталонного значения (δ, %) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | | B | | C | |
| | $t_L$ | $d$ | $t_L$ | $d$ | $t_L$ | $d$ |
| 1 | 994,4 | 16,9% | 889,3 | 25,7% | 1000,1 | 16,5% |
| 3 | 1093,2 | 8,7% | 1017,8 | 15,0% | 1102,7 | 7,9% |
| 5 | 1161,1 | 3,0% | 1094,0 | 8,6% | 1159,2 | 3,2% |
| 8 | 1276,0 | 6,6% | 1234,0 | 3,1% | 1289,0 | 7,7% |
| 10 | 1432,0 | 19,6% | 1388,0 | 15,9% | 1454,0 | 21,5% |

**Таблица 3**

Расчет по упрощенной модели $P_H$ = 10 МПа

| λ \ Вариант упрощенной модели | Время до разрушения ($t_L$, ч) и отклонение результата расчета от эталонного значения (δ, %) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | | B | | C | |
| | $t_L$ | $d$ | $t_L$ | $d$ | $t_L$ | $d$ |
| 1 | 269,3 | 22,1% | 244,1 | 29,4% | 270,6 | 21,7% |
| 3 | 309,1 | 10,6% | 285,8 | 17,3% | 309,4 | 10,5% |
| 5 | 331,6 | 4,1% | 310,6 | 10,1% | 330,6 | 4,3% |
| 8 | 355,6 | 2,9% | 340,0 | 1,6% | 357,3 | 3,4% |
| 10 | 388,5 | 12,4% | 376,4 | 8,9% | 393,8 | 13,9% |

**Таблица 4**

Расчет по обобщенной модели

| Значения параметров модели | | | Время до разрушения ($t_L$, час) и отклонение результата расчета от эталонного значения (δ, %) при давлении водорода $P_H$ (МПа) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $P_H$ = 5 МПа | | $P_H$ = 7,5 МПа | | $P_H$ = 10 МПа | |
| $\mu_0$ | $\mu_П$ | $\mu_{КР}$ | $t_L$ | $d$ | $t_L$ | $d$ | $t_L$ | $d$ |
| 0,05 | 0,218 | 0,915 | 4264,4 | –5,6% | 1156,6 | –3,4% | 346,0 | 0,1% |
| 0,1 | 0,218 | 0,915 | 4268,8 | –5,5% | 1157,7 | –3,3% | 346,3 | 0,2% |
| **0,17** | **0,218** | **0,915** | **4515,7** | **–** | **1197,2** | **–** | **345,6** | **–** |
| 0,18 | 0,218 | 0,915 | 4964,2 | 9,9% | 1285,8 | 7,4% | 357,1 | 3,3% |
| 0,19 | 0,218 | 0,915 | 5128,3 | 13,6% | 1328,3 | 11,0% | 369,0 | 6,8% |
| 0,2 | 0,218 | 0,915 | 5461,9 | 21,0% | 1414,8 | 18,2% | 392,9 | 13,7% |
| 0,17 | 0,2 | 0,915 | 4995,9 | 10,6% | 1294,0 | 8,1% | 359,5 | 4,0% |
| **0,17** | **0,218** | **0,915** | **4515,7** | **–** | **1197,2** | **–** | **345,6** | **–** |
| 0,17 | 0,3 | 0,915 | 4398,2 | –2,6% | 1192,8 | –0,4% | 344,1 | –0,4% |
| 0,17 | 0,4 | 0,915 | 4199,8 | –7,0% | 1139,0 | –4,9% | 340,7 | –1,4% |
| 0,17 | 0,5 | 0,915 | 4336,1 | –4,0% | 1176,0 | –1,8% | 343,8 | –0,5% |
| 0,17 | 0,218 | 0,8 | 4727,0 | 4,7% | 1224,4 | 2,3% | 342,9 | –0,8% |
| 0,17 | 0,218 | 0,9 | 4618,5 | 2,3% | 1196,3 | –0,1% | 343,3 | –0,7% |
| **0,17** | **0,218** | **0,915** | **4515,7** | **–** | **1197,2** | **–** | **345,6** | **–** |
| 0,17 | 0,218 | 0,95 | 4789,3 | 6,1% | 1240,5 | 3,6% | 344,5 | –0,3% |
| 0,17 | 0,218 | 0,99 | 4942,8 | 9,5% | 1280,3 | 6,9% | 355,6 | 2,9% |
| 0,3 | 0,4 | 0,8 | 4241,6 | –6,1% | 1150,4 | –3,9% | 344,1 | –0,4% |
| 0,2 | 0,35 | 0,9 | 4268,5 | –5,5% | 1157,7 | –3,3% | 346,3 | 0,2% |
| **0,17** | **0,218** | **0,915** | **4515,7** | **–** | **1197,2** | **–** | **345,6** | **–** |
| 0,1 | 0,2 | 0,9 | 4244,9 | –6,0% | 1151,3 | –3,8% | 344,4 | –0,3% |
| 0,05 | 0,2 | 0,95 | 4231,6 | –6,3% | 1147,7 | –4,1% | 343,3 | –0,7% |
| 0,01 | 0,25 | 0,99 | 4166,6 | –7,7% | 1130,0 | –5,6% | 338,0 | –2,2% |

При более высоком давлении и меньшем времени разрушения степень влияния этих параметров на результат еще меньше. Так, при давлении 7,5 МПа максимальное отклонение времени разрушения от эталонного значения составило 18,2%, а при 10 МПа – всего 13,7%.

Совместное изменение всех трех параметров практически не оказывает влияние на оценку времени до разрушения (разброс в пределах 5–7 %).

При использовании упрощенной модели максимальное отклонение результата от эталонного значения наблюдается при $\lambda = 1$ (практически до 30%) и по мере увеличения параметра $\lambda$ до 5–8 существенно снижается (в ряде случаев ниже 1%). Следует отметить, что при минимальных значениях $\lambda$ оценка времени до разрушения оказывается существенно заниженной. При дальнейшем увеличении $\lambda$ до 10 наблюдается существенный рост оценки времени до разрушения и отклонения от эталонного значения (при давлении 5 МПа до 30%). Однако, также как и в случае с обобщенной моделью химического взаимодействия, чем меньше время до разрушения, тем ниже отклонение результата от эталонного значения.

## Выводы

1. При достаточно скоротечных процессах (до 500 часов) и в случаях, когда в конструкции преобладают пластические деформации, параметры модели воздействия водородосодержащей среды не оказывают существенного влияния на результат расчета, поскольку определяющим фактором разрушения является повреждаемость материалов при ползучести. В данном случае выбор модели воздействия водородосодержащей среды и ее параметров не имеет существенного значения. В некоторых случаях можно даже пренебречь воздействием водорода без существенного ухудшения результатов расчетов.

2. В случаях, когда время до начала процесса разрушения более 1000 и менее 4000 часов и при отсутствии пластических деформации, степень влияния водородосодержащей среды на длительную прочность конструкции увеличивается. Возможно, это является следствием водородного охрупчивания стали, а как известно, в области упругих деформаций в условиях ползучести преобладает хрупкий характер разрушения [6]. В этом случае рекомендуется провести пробный расчет с использованием нескольких моделей учета воздействия водорода, и разными параметрами, а затем сравнить полученные результаты. В случае значительного (более 20%) разброса результатов следует брать за основу результаты, полученные с использованием обобщенной модели.

3. При моделировании процессов разрушения продолжительностью более 4000 часов необходимо относиться к выбору параметров модели очень внимательно. Желательно использовать обобщенные модели и рекомендуемые для них параметры. Некорректный выбор этих параметров чаще всего приводит к существенному завышению оценки времени до разрушения конструкции.

4. При использовании упрощенных моделей любого вида параметр $\lambda$ следует брать тем больше, чем меньше время до разрушения, но при этом $\lambda$ должен быть от 5 до 8.

5. В рамках используемой в данной работе методики расчета оболочек полученные результаты могут быть применены для конструкций любой формы, поскольку результат работы модели воздействия водородосодержащей среды влияет только на выбор материала конструкции – в исходном, промежуточном или полностью обезуглероженном состоянии.

6. Все выводы, полученные в данной работе, были сделаны применительно к малоуглеродистым сталям. При использовании сплавов с легирующими добавками, поведение которых в условиях воздействия водорода отличается от малоуглеродистых сталей, требуются дополнительные исследования.

## Список литературы

1. Белов А.В. Осесимметричное упругопластическое напряженно-деформированное состояние оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1989. – 18 с.

2. Белов А.В., Поливанов А.А., Попов А.Г. Расчет пластин и оболочек с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 5. – С. 61–68.

3. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 311 с.

4. Овчинников И.Г., Хвалько Т.А. Работоспособность конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии. – Саратов, 2003. – 176 с.

5. Поливанов А.А. Осесимметричное упругопластическое деформирование многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2004. – 19 с.

6. Шевченко Ю.Н., Мазур В.Н. Решение плоских и осесимметричных краевых задач термовязкопластичности с учетом повреждаемости материала при ползучести // Прикл. механика. – 1986. –№ 8. – С.3–14.

7. Bagmutov V., Belov A., Polivanov A. Damage Calculation Features of Multi-layered Shells of Rotation at Thermo – Viscous – Elasto – Plastic Strain // MECHANIKA. – 2004. – № 3(47) – P. 19–23.

## References

1. Belov A.V. Osesimmetrichnoe uprugoplasticheskoe naprjazhenno – deformirovannoe sostojanie obolochek vrashhenija s uchetom povrezhdaemosti materiala pri polzuchesti: Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk. Kiev, 1989. 18 p.

2. Belov A.V., Polivanov A.A., Popov A.G. Raschet plastin i obolochek s uchetom povrezhdaemosti materialov pri polzuchesti i vysokotemperaturnojj vodorodnojj korrozii // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2009. no. 5. pp. 61–68.

3. Kachanov L.M. Osnovy mekhaniki razrushenija. M.: Nauka, 1974. 311 p.

4. Ovchinnikov I.G., Khvalko T.A. Rabotosposobnost konstrukcijj v uslovijakh vysokotemperaturnojj vodorodnojj korrozii: Saratov, 2003. 176 p.

5. Polivanov A.A. Osesimmetrichnoe uprugoplasticheskoe deformirovanie mnogoslojjnykh obolochek vrashhenija s uchetom povrezhdaemosti materiala pri polzuchesti: Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk. Volgograd, 2004. 19 p.

6. Shevchenko J.N., Mazur V.N. Reshenie ploskikh i osesimmetrichnykh kraevykh zadach termovjazkoplastichnosti s uchetom povrezhdaemosti materiala pri polzuchesti // Prikl. mekhanika. 1986. no. 8. pp. 3–14.

7. Bagmutov V., Belov A., Polivanov A. Damage Calculation Features of Multi-layered Shells of Rotation at Thermo – Viscous – Elasto – Plastic Strain // MECHANIKA, 2004, no. 3(47) pp. 19–23.

**Рецензенты:**

Богданов Е.П., д.т.н., профессор кафедры «Информационные системы и технологии» ФГОУ ВПО Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия, г. Волгоград;

Овчинников И.Г., д.т.н., профессор, ФГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов.

Работа поступила в редакцию 12.12.2012.