УДК 539.3

В. С. ГУДРАМОВИЧ

ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ В ОБЛАСТИ ТЕОРИИ ПОЛЗУЧЕСТИ В ИНСТИТУТЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ И ГОСУДАРСТВЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА УКРАИНЫ

Цель: обзор исследований в области теории ползучести, проведенных в Институте технической механики национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ). **Метод:** метод продолжения по параметру (время) в задачах выпучивания оболочек при ползучести. **Результаты:** приведен обзор исследований в области теории ползучести, проведенных в ИТМ НАНУ и ГКАУ. Исследовано выпучивание оболочек при ползучести материала с учетом пластических деформаций, полученных при предварительном сложном нагружении, выпучивание подкрепленных оболочек при ползучести. Приведены данные по экспериментальным исследованиям.

Ціль: огляд досліджень в області теорії повзучості, проведених в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ). **Метод:** метод продовження по параметру (час) в задачах випучування оболонок при повзучості. **Результати:** наведено огляд досліджень в області теорії повзучості, проведених у ІТМ НАНУ і ДКАУ. Досліджено випучування оболонок при повзучості матеріалу з урахуванням пластичних деформацій, отриманих при попередньому складному навантаженні, випучування підкріплених оболонок при повзучості. Наведено дані з експериментальних досліджень.

An overview of the studies associated with the creep theory and conducted at the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine (ITM, NASU& SSAU) is provided. The method of a parametric prolongation (time) for the problems of shells buckling in creep is employed. Shells buckling in creep considering plastic deformations in preliminary complex loading and stiffened shells buckling in creep are studied. The data of experimental investigations are presented.

Ключевые слова: *теория ползучести, ракетно-космическая техника, выпучивание при ползучести, оболочка, критическое время, эксперимент.*

В науках о прочности и надежности, которые лежат в основе научного направления деятельности в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ) “Прочность, надежность и оптимизация сложных механических систем и ракетно-технической техники”, теория ползучести занимает важное место.

Эта теория объединяет явления, связанные с учетом времени в задачах механики деформируемого твердого тела и прочности конструкций.

В ракетно-космической технике это важно для высоких температур при эксплуатации, когда ползучесть особо опасна и может привести к преждевременному разрушению элементов конструкций. Особый класс задач прочности связан с явлением так называемой “холодной ползучести” при обычных температурах, когда напряжения близки к пределу текучести материала. Накопление деформаций ползучести может привести к потере устойчивости тонкостенных оболочечных конструкций. Возможность такого сценария разрушения ракет-носителей (РН) вызвала особо пристальное внимание в разработке РН при так называемой “ампульной” схеме: жидкостная РН находится в заправленном состоянии много лет с возможностью старта в любой момент. Это привело к обращению серьезного внимания на развитие теории ползучести, в частности теории устойчивости при ползучести тонкостенных элементов конструкции, в 80-х годах прошлого столетия в научно-исследовательских организациях, связанных с исследованием научных про-

© В. С. Гудрамович, 2015

блем ракетно-космической техники (ЦНИИМаш, СибНИА, КБ “Южное”, ИТМ АН УССР и др.). Результаты НИР, полученные в области теории ползучести и ее приложений в нашем институте, прокомментированы ниже.

Оценка фактора времени имеет принципиальное значение при оценке прочности конструкций. Введение времени в исследование прочности – это не какой-то новый акт; время учитывается в задачах динамики, где определена зависимость параметров от скоростей и ускорений. Особенностью теории ползучести является то, что она учитывает время в медленных процессах деформирования, связанных с изменением структуры материала, когда силы инерции можно считать пренебрежимо малыми. Ползучесть в широком смысле – это изменение во времени деформаций и напряжений, возникших при начальном нагружении. В списке литературы приведены монографии в области теории ползучести [1 – 10] и статьи, где отражены работы сотрудников нашего института в области теории ползучести и ее приложений [11 – 22].

В 1982 г. в г. Днепропетровске был проведен Всесоюзный симпозиум “Ползучесть в конструкциях”, где приняли участие известные ученые страны.

Сопредседатели симпозиума: акад. АН Армении Н. Х. Арутюнян и акад. АН Украины В. И. Моссаковский, заместитель сопредседателей – В. С. Гудрамович.

Рис. 1

На фотографии рис. 1 показан президиум заседания при открытии симпозиума. Слева направо: д.т.н. Н. Н. Малинин (МВТУ им. Н. Э. Баумана, Москва); д. ф.-м. н. Ю. А. Мельников (США); чл.-корр. АН Украины П. И. Никитин (КБ “Южное”); к.ф.-м.н. А. Б. Кавура (ДНУ); проф. Е. Р. Абрамовский (ДНУ); д. т. н. А. М. Жуков (ИПМ РАН, Москва), д. т. н. Л. И. Маневич (ИХФ РАН, Москва); акад. НАН Украины В. В. Пилипенко; д. ф.-м. н. В. А. Пальмов (Политехн. ин-т, С.-Петербург); акад. АН Армении Н. Х. Арутюнян (ИПМ РАН, Москва); чл.-корр. НАН Украины В. С. Гудра-

мович; д. ф.-м. н. В. М. Александров (ИПМ РАН, Москва); чл.-корр. РАН строительства и архитектуры А. Р. Ржаницын (МИСИ, Москва).

На пленарном заседании при открытии симпозиума были сделаны доклады ученых Армении, Москвы, Новосибирска и Днепропетровска: П. И. Никитин, В. С. Гудрамович, И. Ф. Ларионов (КБ “Южное”, ИТМ АН Украины) “Устойчивость оболочек в условиях ползучести”.

Исследования в области теории ползучести в нашем институте проводились по следующим основным направлениям: выпучивание оболочек в условиях ползучести при учете пластических деформаций, полученных при предварительном сложном нагружении; разработка и применение в задачах выпучивания уравнений теории подкрепленных оболочек, экспериментальные исследования [3, 7 , 11 – 22]. Эти направления были мало разработаны и тесно связаны с теми практическими задачами, о которых сказано выше.

Ползучесть – изменение (рост) деформаций при постоянных нагрузках (изменение напряжений при постоянных деформациях – релаксация). Основные сведения по теории ползучести изложены в [1 – 10].

При исследовании устойчивости при ползучести определяется критическое время. Среди критериев устойчивости реальным содержанием отличается критерий начальных несовершенств Хоффа–Работнова [3, 8], в соответствии с которым исследуется развитие во времени начальных геометрических несовершенств при постоянных нагрузках. Критическое время определяет момент, когда резко возрастают максимальные прогибы в элементах конструкции. Эффективным является подход, идеология которого восходит к методу продолжения по параметру [22]. В качестве такого параметра в задачах предельных состояний тонкостенных элементов конструкций принимается нагрузка. Исследуется реакция элементов на малые приращения нагрузки (при геометрически и физически нелинейном деформировании и учете начальных несовершенств). Строится зависимость “нагрузка – максимальный прогиб”. При определенном значении нагрузки резко возрастает прогиб, что определяет предельное состояние [22, 23]. В задачах устойчивости при ползучести таким параметром является время, т. е. исследуется реакция элементов конструкции на малые приращения времени (при постоянной нагрузке). Строится зависимость прогиба от времени. Критическое время определяется резким возрастанием прогиба.

Отметим, что в задачах теории ползучести при использовании критерия начальных несовершенств более приемлемым является использование термина “выпучивание” вместо “устойчивость” (по известному выражению Койтера, в задачах предельных состояний реальных систем “бифуркация является скорее исключением, чем правилом” [22]).

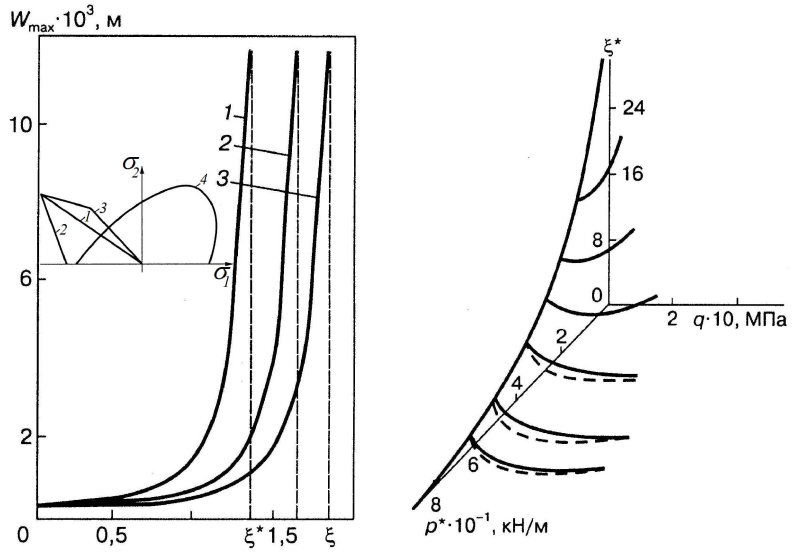
Пластические деформации при сложном нагружении исследованы нами на основе варианта анизотропной теории течения: теории трансляционно-кинематического упрочнения В. В. Новожилова – Ю. И. Кадашевича. При использовании этой теории определяются микронапряжения, которые определяют особенности пластического деформирования для различных программ нагружения [11, 12]. Построены уравнения для исследования ползучести оболочек при возникших пластических деформациях.

На рис. 2, а показаны графики изменения прогиба для цилиндрической оболочки из алюминиево-магниевого сплава АМГ6М при осевом сжатии и внутреннем давлении и температуре $T° = 150^{\circ}C$ с начальным прогибом

$w_0 = 0{,}4h$, $R/h = 176$, $L/R = 4{,}83$ (R, L, h – радиус, длина и толщина оболочки).

Использована степенная зависимость скорости интенсивности деформаций ползучести p_i от интенсивности напряжений σ_i: $p_i = A\sigma_i^n$.

Параметр осевой сжимающей силы T $t = T/2\pi Rh = 60$ Н/м^2; в степенном законе ползучести принято: $n = 3$. Кривые 1 – 3 соответствуют значениям внутреннего давления, равным соответственно 0,136; 0,17; 0,23 МПа. По осям отложено суммарное значение прогиба $w_{\max}$ (сумма максимального и начального прогибов), безразмерный параметр времени $\xi = Ep_i/\sigma_i$ (E – модуль упругости; p_i, σ_i – интенсивности деформаций ползучести и напряжений); звездочкой обозначен параметр критического времени ($\xi = \xi^*$ при $w_{\max} \to \infty$).



а б

Рис. 2

Мгновенные пластические деформации определялись для программы нагружения, когда осевая сила T и внутреннее давление изменяются пропорционально одному параметру. Численный анализ показал, что при учете мгновенных пластических деформаций качественно меняется влияние внутреннего давления: с увеличением q при постоянном значении T критическое время снижается (в отличие от деформирования оболочек при упругих деформациях, когда оно возрастает). Отметим, что таким же является качественное влияние q в задачах устойчивости цилиндрической оболочки при пластических деформациях [12].

При расчетах наряду с простым нагружением (программа 1 в верхней части рис. 2, а: пропорциональное изменение нагрузок $\sigma_2 = K\sigma_1$; $\sigma_1 = t$; $\sigma_2 = qR/h$; $K = -0{,}333$) было реализовано несколько сложных путей нагружения в виде ломаных: изменение осевого напряжения с выходом его за предел текучести с последующим пропорциональным изменением нагрузок

$K = -2$ (программа 2); пропорциональное изменение нагрузок с выходом за предел текучести и последующим пропорциональным нагружением с другим коэффициентом $K = -0{,}16$ в области пластического деформирования. На рис. 2, а кривая 4 – граница, отделяющая упругую и пластическую области деформирования.

Численный анализ показывает, что любой сложный путь нагружения дает более высокие значения ξ^*, чем простое нагружение (программа 1). Таким образом, за счет предварительного упрочнения материала оболочки можно повысить ξ. Однако влияние мгновенных пластических деформаций, накопленных при сложных историях нагружения, невелико [3]. Это же было получено для стержней [8].

На рис. 2, б построена поверхность, определяющая предельное состояние оболочки при выпучивании в условиях ползучести. Сплошные линии соответствуют расчету при упругих деформациях, пунктирные – при учете истории сложного нагружения с учетом мгновенных пластических деформаций. При расчетах использована диаграмма деформирования АМГ6М при $T^0 = 150$ °С ($E = 5{,}9 \cdot 10^4$ МПа; условный предел текучести $\sigma_s = 125$ МПа).

При исследовании выпучивания подкрепленных оболочек в условиях ползучести в основном использована конструктивно-ортотропная схема, построены соответствующие уравнения. Использованы теории деформации и течения; расчеты, как правило, проводились для степенного закона ползучести [7, 16 – 19].

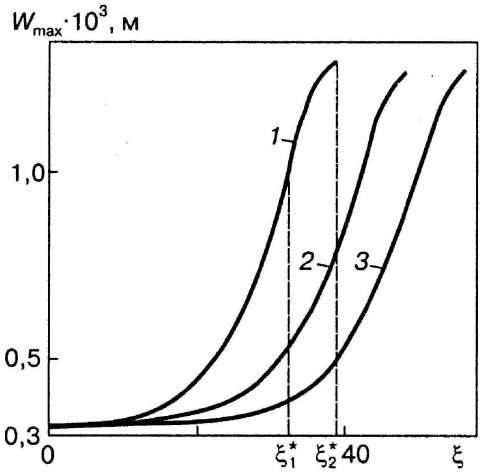


Рис. 3

На рис. 3 приведены графики зависимости максимального прогиба от параметра времени при расчете на основе разработанных уравнений цилиндрической оболочки из сплава Д16Т при $T^0 = 250$ °С с параметрами $R/h = 172$; $L/R = 4{,}83$; $h_1/\delta_1 = h_2/\delta_2 = 3$; $h_1/e_1 = h_2/e_2 = 0{,}025$ (h_i; δ_i; e_i – соответственно высота, ширина и эксцентриситет стрингеров и шпангоутов прямоугольного поперечного сечения) при заданном начальном

прогибе $w_0 = 0{,}4h$ при постоянных нагрузках $t = 52$ Н/м^2; $q = 0$ и $t = 52$ Н/м^2; $q = 0{,}26$ МПа (кривые 1, 2 соответственно).

Для аппроксимации прогиба при выпучивании взята зависимость

$$w = f_1 \sin\lambda x \sin\eta y + f_2 \sin^2\lambda x \sin^2\eta y ,$$

где $\lambda = m\pi/R$; $\eta = n/R$; m , n – число волн в продольном и окружном направлении.

Исследована сходимость результатов расчета f_1 и f_2 для различных приращений $d\xi$. Для $d\xi = 0{,}01$ и $d\xi = 0{,}001$ значения f_1 и f_2 различались менее чем на 5%.

На рис. 3 приведены также результаты анализа влияния расположения ребер жесткости (наружное или внутренние). Это расположение учитывается с помощью знака статического момента инерции ребер. Кривые 2 и 3 построены соответственно для наружного и внутреннего подкреплений при одинаковых параметрах оболочки ($t = 52$ Н/м^2, $q = 0{,}26$ МПа). Для наружного подкрепления параметр критического времени меньше, чем для внутреннего. Критическое время, определенное на основе разработанных методик, удовлетворительно соответствует экспериментальным данным для вафельных оболочек из АМГ6М при $T^0 = 250 - 300$ ˚С (КБ “Южное”, СибНИА) [7].

Рис. 4

Для экспериментального исследования выпучивания оболочек в условиях ползучести в ИТМ НАНУ и ГКАУ разработана специальная установка для испытаний гладких и подкрепленных оболочек при осевой сжимающей силе и внутреннем давлении в условиях ползучести [20]. Она предусматривает поддержание постоянной нагрузки. Обеспечиваются замеры деформаций

ползучести, температура при необходимости может быть создана инфракрасными нагревателями. На фотографии рис. 4 показана эта установка, изготовленная в ИТМ НАНУ и ГКАУ, с помещенными в нее для испытаний моделями топливных баков РН.

1. *Арутюнян Н. Х.* Некоторые вопросы теории ползучести / *Н. Х. Арутюнян.* – М. : Гостехиздат, 1952. – 323 с.
2. *Гольденблатт И. И.* Длительная прочность в машиностроении / *И. И. Гольденблатт, В. Л. Бажанов, В. А. Копнов*. – М. : Машиностроение, 1977. – 248 с.
3. *Гудрамович В. С.* Теория ползучести и ее приложения к расчету тонкостенных конструкций / *В. С. Гудрамович*. – К. : Наук. думка, 2005. – 224 с.
4. *Качанов Л. М.* Теория ползучести / *Л. М. Качанов*. – М. : Физматгиз, 1960. – 455 с.
5. *Малинин Н. Н.* Расчеты на ползучесть элементов машиностроительных конструкций / *Н. Н. Малинин*. – М. : Машиностроение, 1981. – 224 с.
6. *Писаренко Г. С.* Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / *Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев*. – К. : Наук. думка, 1976. – 415 с.
7. Предельные состояния оболочек при сложном нагружении и ползучести материала / *В. С. Гудрамович, В. П. Герасимов, В. С. Коноваленков, В. П. Пошивалов*. – К. : Наук. думка, 1984. – 254 с.
8. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций / *Ю. Н. Работнов.* – М. : Наука, 1966. – 752 с.
9. *Ржаницын А. Р.* Теория ползучести / *А. Р. Ржаницын*. – М. : Стройиздат, 1968. – 416 с.
10. *Терегулов И. Г.* Изгиб и устойчивость тонких пластин и оболочек при ползучести / *И. Г. Терегулов*. – М. : Наука, 1969. – 206 с.
11. *Гудрамович В. С.* О критических поверхностях в задачах выпучивания пластин и оболочек за пределами упругости / *В. С. Гудрамович* // X Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин, 1975 г., Кутаиси : труды. – Тбилиси : Мецниереба, 1975. – Т. 1. – С. 366 – 373.
12. *Гудрамович В. С.* Устойчивость упругопластических оболочек / *В. С. Гудрамович*. – К. : Наук. думка, 1987. – 216 с.
13. *Гудрамович В. С.* Исследование прочности конструкций ракетно-космической техники в некоторых экстремальных случаях нагружения / *В. С. Гудрамович* // Техн. механика. – 2001. – № 2. – С. 74 – 87.
14. *Гудрамович В. С.* Исследование критических состояний тонкостенных элементов конструкций с учетом истории сложного нагружения при пластическом деформировании и в условиях ползучести / *В. С. Гудрамович, В. С. Коноваленков, В. П. Пошивалов* // V Всесоюз. съезд по теорет. и прикл. механике, 1981 г., Алма-Ата : аннот. докл. – Алма-Ата : Наука, 1981. – С. 128.
15. *Гудрамович В. С.* К исследованию выпучивания оболочек в условиях ползучести / *В. С. Гудрамович, В. П. Пошивалов* // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 245, № 6. – С. 1329 – 1332.
16. *Гудрамович В. С.* Об устойчивости цилиндрических оболочек в условиях ползучести / *В. С. Гудрамович, В. П. Пошивалов* // Механика деформируемых сред. Межвуз. сб. – Куйбышев : Куйбышев. ун-т, 1981. – С. 56 – 60.
17. *Гудрамович В. С.* Выпучивание оболочек, в условиях ползучести / *В. С. Гудрамович, В. П. Пошивалов* // Прочность и надежность элементов конструкций. Сб. науч. тр. – К. : Наук. думка, 1982. – С. 49 – 58.
18. *Пошивалов В. П.* Выпучивание подкрепленных цилиндрических оболочек при ползучести по теории упрочнения / *В. П. Пошивалов* // Изв. АН СССР. МТТ. – 1987. – № 1. – С. 153 – 155.
19. *Пошивалов В. П.* Длительная прочность и долговечность элементов конструкций / *В. П. Пошивалов*. – К. : Наук. думка, 1992. – 119 с.
20. А. с. 930056 СССР, МКИ G 01 N 3/08. Установка для испытания на ползучесть и длительную прочность / *В. С. Гудрамович, А. П. Гайдученко, М. Ф. Демешко, Л. В. Михайленко.* – опубл. 23.05.1982, Бюл. № 19. – 5 с.
21. *Hudramovich V. S.* Plastic and creep instability of shells with initial imperfections / *V. S. Hudramovich* // Solid mechanics and its applications. – Dordrecht, Boston, London : Kluwer Acad. Publ., 1997. – V. 64. – P. 277 – 289.
22. *Hudramovich V. S.* Features of nonlinear deformation and critical states of shell systems with geometrical imperfections / *V. S. Hudramovich* // Intern. Appl. Mech. – 2006. – V. 42, No. 12. – P. 1323 – 1355.
23. *Hudramovich V. S.* Plastic devormation and limit states of metal shell structures with initial shape imperfections / *V. S. Hudramovich, A. A. Lebedev, V. I. Mossakovsky* // Light – weight steel and aluminium structures. – Amsterdam, Lousanne, Nev York, Oxford : Elsevier, 1999. – P. 257 – 263.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агенства Украины,
Днепропетровск

Получено 07.10.2015,
в окончательном варианте 20.10.2015