薄壳的蠕变

А. В. Бурлаков

在非弹性变形固体力学的许多问题中，结构构件的蠕变（尤其是薄壳的蠕变）占有显著的地位，并具有越来越大的意义。这同机器零件或设备上的力及温度的作用加大有关，也同现代技术中广泛使用轻合金、塑料以及其它人造材料有关，这类材料在常温或温度稍许提高时都显出蠕变。最近，壳的蠕变理论作为非线性变形体力学的比较年青领域得到了重大发展。

我们来探讨一下薄壳蠕变理论问题的一些基本方向和解法，但不涉及在粘弹性理论方程基础上研究壳蠕变的工作，也不涉及在蠕变条件下的壳稳定问题。

壳的定常蠕变问题的方程和解法

在非弹性状态的非线性理论基础上解壳的蠕变问题极端困难，所以把主要精力集中在定常蠕变问题上。这些解使我们可以对弹性状态定出应变率和应力的重新分布。

定常蠕变壳的大部分解析研究，以流动理论作为依据。这些理论显然只含有应变率分量和应力本身。考虑到材料在蠕变时的不可压缩性，应变率与应力的关系写成下式：

$$\dot{\varepsilon}_{ij}=f(\sigma_{ij})\,\bar{\sigma}_{ij} \qquad (1)$$

式中，$f(\sigma_{ij})$为应力张量不变量的标量函数；$\bar{\sigma}_{ij}$为应力偏量分量。

对于任意蠕变定律都可求得壳的定常蠕变问题的解。但是，很多实用的解都利用单轴应力状态 $\dot{\varepsilon}=k\sigma^{n}$ 的下列广义幂关系求得：

$$(\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij})^{1/2}=B(\bar{\sigma}_{ij}\bar{\sigma}_{ij})^{n/2}$$
$$\dot{\varepsilon}_{ii}=0 \qquad (2)$$

对于幂定律情况，寻找问题的近似解，可以利用关于固定能量耗散率注入曲面的Калладин-Друкер 定理[1]。В. И. Розенблюм [2] 曾依据此定理推得薄壳定常蠕变理论中的力、力矩与变形间的简化关系。在求某些问题的解的过程中，则在上述方程的基础上采用变分法，尤其是 Л. М. Качанов [3] 法。作为例子，研究了“缠绕”圆柱壳的蠕变问题。

蠕变理论中最普遍的假设之一，是关于势的存在假设，依据此假设得出了应力与应变率间的关系。如无必要严格的话，该假设在蠕变理论中能表达出类似非线性弹性体变分原理的变分原理，并用作解决问题的近似方法[2,4—7]。在这种情况下，应变率张量分量和应力张量分量可按下式求出：

$$\dot{\varepsilon}_{ij}=\partial\Phi/\partial\sigma_{ij}$$
$$\sigma_{ij}=\partial\nu/\partial\dot{\varepsilon}_{ij} \qquad (3)$$

式中，Φ是蠕变率势；ν是应力势；$\nu=L-\Phi$（L是耗散功率，系指每单位时间的单位体积中的塑性应变功）。我们把一方是力与力矩，另一方是应变率与曲率改变量之间的关系写成类似于公式(3)。不过，只对简单壳（无矩壳和纯力矩壳是最简单壳）才能找到力和力矩势，蠕变率势。

文献[5]中，列有利用变分法解决轴对称圆柱壳的定常蠕变问题的这种方法的最简

单例Ꞁ。同时建立了双层壳模型。但是，凡涉及用双层壳模型代替真实壳的一些简化；还谈不上实现建立壳蠕变理论的一般方程及其解的有效方法[5]。

以引入逼近加载曲面作为依据的类似方法，已为 В. И. Розенблюм[2]用来得到壳的定常蠕变的定解方程。在这种情况下，在曲线坐标α，β上的方程具有下列含强化的塑性理论方程所对应的形式：

$$\dot{\varepsilon}_{\alpha\beta}=G(F)\partial F/\partial T_{\alpha\beta} \quad (4)$$

式中因子 $G(F)$ 用同最简单的解相对比的方法来选取（F 为力和力矩的二次函数）。

如果函数 F 是一次幂的齐次函数，则方程(4)在建立一次幂的齐次函数 $\Psi(\dot{\varepsilon}_\alpha,\cdots,\chi_\alpha)$ 的条件下，可对力和力矩解出来。而其逆关系式具有如下形式：

$$T_{\alpha\beta}=Q(\Psi)\partial\Psi/\partial\dot{\varepsilon}_{\alpha\beta} \quad (5)$$

式中，$Q(\Psi)$ 是 G 的逆函数。利用变分原理推出以方程(5)作基础的解答。

Г. И. Иванов[8]利用蠕变势的概念得到壳的定常蠕变的力、力矩和应变率间的简化关系，使蠕变势给出无矩状态和纯力矩状态的精确解，又包含有从最佳近似精确表达式的条件中所确定的若干数目的自由参数。

有限位移的虚蠕变率变分原理已由 И. Г. Терегулов[6]引入板壳的定常蠕变理论中。在他的专著[7]和其它一些著作里，和其它问题同时，也探讨了壳的定常蠕变的某些问题。

一般空间情况的定常蠕变方程，就其构造来看，跟具有强化的塑性变形理论方程相类似。壳在定常蠕变状态下的定解方程，同样可以从它相应的壳的弹塑性方程中获得。为此，在这些方程中必须用相应的应变率来代替中面上的应变分量，而选择适当的蠕变应力强度与应变率之间的关系来代替强化函数 $\sigma_i=\sigma_i(\varepsilon_i)$。

为找出中面上的应变率分量与中面位移率矢量的分量之间的关系，必须将弹性壳的相应关系对时间进行微分。在这种提法下，壳的定常蠕变问题可借助于数值方法来求解，例如，И. А. Биргер的变弹性参数法[9]，А. А. Ильюшин的弹性解法[10]。

以应力和应变率之间的非线性关系作为基础的壳的定常蠕变问题的解表明，壳中的应力分布和弹性状态的应力分布相比较发生非常重要的改变。这个效应随着定解方程中的非线性幂的增高而更加显著。

Р. Бейли[11]与 В. И. Розенблюм[12]是壳的非线性蠕变领域里的首批开始研究的作者之一。继后，Л. М. Качанов[13]曾经研究过各种壁厚的卵形管子的蠕变。

壳的定常蠕变的大部分问题，都属于轴对称圆柱壳。例如，在[14]中分析了承受内压、轴力和扭矩作用的圆柱壳的变形状态，该问题的解是用小弹塑性变形理论和 Беляев-Малинин 的老化假设作为基础的。

有些作者的著作，论述了半无限长轴对称圆柱壳中的边界效应的研究。某些问题已为 Ю. Н. Работнов[5]所研究。圆柱壳的轴对称定常蠕变方程归结为如下方程组：

$$\begin{aligned}&U''-2m\omega=0\\&m''-(2U/\omega)+2P=0\end{aligned} \quad (6)$$

这里，P 是无量纲法向载荷；U，m 分别为无量纲的环向应变和轴向弯矩；ω 是 U，m 的函数；对无量纲变量进行微分。借助于变分法求得解答，将方程(6)作为欧拉方程的泛函来求。对于具有铰支边、固支边的半无限长壳，以及承受分布压力和轴力作用的壳的边界效应作了研究。

对于半无限长的固定端壳的同样问题，已由 Ю. М. Волчков[15]根据方程(6)加以解决，他用逐次近似法对方程(6)进行数值积分。非线性蠕变对无端载圆柱壳中的应力分布的影响，在[16]中探讨过。[17]中

研究了边界效应，用数值法解算了由力、力矩和中面应变率之间的关系，以及平衡方程和几何方程所组成的非线性方程组。对于半无限长圆柱壳得出了弯矩、环向力与位移的分布。

И. В. Стасенко [18,19] 曾分析过圆柱壳在边界效应区域的定常蠕变。圆柱壳的蠕变已由 Б. В. Зверьков [20] 以及在[21—24] 中进行了研究。其它几何形状壳的定常蠕变也是就最简单的情况研究的。

轴对称薄膜壳的蠕变应变，已为 Л. М. Качанов [4]，以及在 [25,26] 中探讨过。由于薄膜壳的静定性，使很多情况下的应变对相应的边界条件不难求出来。在 [27,28] 中叙述了求解回转扁壳定常蠕变问题的近似方法。

锥壳在边界效应区域的蠕变是由 В. И. Данилов [29] 研究的。壳上受有均匀分布外压和沿两端截面上的均匀压力，并取流动假设作为蠕变理论。[30] 中研究了三层圆柱壳在定常蠕变条件下的轴对称应变，该文采用以分段线性函数形式所表示的蠕变势。受轴对称加载的圆柱壳的定常蠕变的近似方程，在 В. Н. Мазалов 和 Ю. В. Немировский [31] 的著作中利用双层模型和分段线性蠕变势推导出来。

可见，为了分析壳的定常蠕变利用了各种不同的方程和假设。问题的解也用各种方法得到。然而，所得的解大体上都属于受轴对称载荷作用的最简单形式的壳。

壳的非定常蠕变

根据定常蠕变理论计算壳，正象其它结构构件的计算一样，是以应力不随时间而变的假设作为基础的。这样，尽管应力分布规律和弹性状态的应力分布不同，但此假设不符合现象的物理本质。因为现象的物理本质是，承受外力的任意形状物体中的应力皆随时间而重新分布。正如计算所表明的那样，虽说这些应力会趋向于定常蠕变状态，但在有限的时间内完全实现不了。

在解决大量重要的实用问题时，必须研究和预测应力随时间的变化。这些变化特别牵涉到松弛问题。此外，定常蠕变的假设，在很多情况下会推出过分低的位移值。

但是，以非线性理论作为基础的壳的非定常蠕变问题的精确解，甚至在简单情况下就数学关系来说都是困难的。

假若方程式具有 Ю. Н. Работнов[5] 老化理论方案的形式，就能实现最简单地建立壳的非定常蠕变理论。在这种情况下，对于每一瞬时的计算就与按照具有强化的塑性变形理论的弹塑性计算相类似。

在壳的蠕变理论中之所以采用近似方程，除了考虑到简便之外，还可列举这样一些理由：材料的原始蠕变方程，其本身在非定常蠕变领域里往往给出比较低的精确度。

以流动假设作为基础的建立上述理论的广为熟知的方案之一，曾由 В. Н. Розенблюм [32] 研究过。他为了近似地分析壳的非定常蠕变假设伸长率、剪切、曲率变化和扭转同力和力矩相联系的关系式为

$$\dot{\varepsilon}_\alpha = \frac{1}{Eh}(\dot{T}_\alpha - \nu\dot{T}_\beta) + \frac{B_1(t)}{h}F^{n-1}(T_\alpha - \frac{1}{2}T_\beta) \quad (7)$$

式中，函数 F 和式（4）的一样。

对无矩壳来说，方程（7）变成精确关系式。特别是在轴对称壳的情况下，我们已得出解答 [4,33,34]。方程（7）可以写成下式：

$$\dot{\varepsilon}_\alpha = \frac{\partial}{\partial T_\alpha}\left(Л^* + \frac{\partial \Pi^*}{\partial t}\right)\cdots$$

$$\dot{\chi}_\alpha = \frac{\partial}{\partial M_\alpha}\left(Л^* + \frac{\partial \Pi^*}{\partial t}\right)\cdots$$

式中，$Л^* = B_1(t)F^{n+1}/[(n+1)h^n]$

$$\Pi^* = \frac{1}{2Fh}\left[\left(T_\alpha^2 - 2\nu T_\alpha T_\beta + \cdots\right) + \frac{12}{h^2}\left(M_\alpha^2 - 2\nu M_\alpha M_\beta + \cdots\right)\right]$$

由此推出变分原理为

$$\int \delta_s\left(Л^* + \frac{\partial \Pi^*}{\partial t} ds = 0 \qquad (8)$$

为了借助于变分方程（8）建立近似解，采用了由Л. М. Качанов所发展的一般方法[4]。

作为壳的非定常蠕变问题的一个简单的例子，就是无矩壳的蠕变。

В. И. Розенблюм[34]研究了无矩壳的非定常蠕变。文中，作为例子研究了端部固定、承受内压的锥壳中的力的松弛。Р. М. Кимакосян[30]等人的著作论述了在非定常蠕变情况下的无矩回转壳问题的解。而以强化幂定律作为依据，又在构造上同强化理论一般方程相类似的壳的非定常蠕变近似方程，已为Ю. Н. Работнов[35]所提出。

壳的非定常蠕变微分方程组含有对时间的一次导数。若用差分关系来代替这些方程组，可以求出逐次接近瞬时的应力状态。但在每个时间间隔内，必须解线性方程组。这种积分非定常蠕变方程的方法（"增量"法）在[36]中有阐述。应变增量将为具有同时间无关，但为坐标函数的系数的应力增量的线性函数。这种增量是以同各向异性非均质体的虎克定律相类似的关系而彼此联系着的。把从前一次加载阶段计算所得出的数值当作一次近似的系数。然后，用逐次近似法使之更加精确[9,37]。

借助于老化假设所建立的方程组，不含有对时间的导数。时间只作为一个参数包含在方程组里。这样，对每一瞬时都发生同弹塑性变形理论问题相类似的问题。用数值法以及变分法都可求出解来。

文献[36]中所讲述的"增量"法，已由П. С. Куратов与А. И. Левченко[38]用于求受轴向和径向载荷作用的，以流动假设作为基础的薄壁回转壳的非定常蠕变问题的解。在[39]中，采用"时步"法于圆柱壳的非定常蠕变分析过程中。在[4]中指出了对交变载荷和温度条件下的回转扁壳的塑性和蠕变的一般计算方法的使用。在И. В. Стесенко[41]的论著里，研究了受轴对称加载的圆柱壳在刚性固定边缘效应区域中的非定常蠕变。该问题是用逐次"时步"法得出的。

求解非定常蠕变问题的广义增量法，在[42]中有论述。该文将待定函数展成时间的泰勒级数，进而逐次解算待定函数对时间的一次和逐次导数的线性边界问题。

用亚当姆斯、龙格-库塔法，将常微分方程的线性边界问题化为对其逐次直接数值积分的柯西问题，已被广泛推广。该法在电子计算机上解算时，可以很好地加以算法化。但是，对于长壳情况，所述方法将造成相当大的计算误差。因此采用螺旋法[43]，离散正交化法[44]，等等。例如，И. Г. Гурьев[45]的著作中，在分析圆柱壳的非定常蠕变时，是把螺旋法和时步法同时使用的。问题是用强化假设作为基础解出来的。应该指出，所有的方法都使计算算法复杂化，而且增加机器时间的消耗。

另一种方法，它同已研究的求壳的非定常蠕变问题解的方法不同之处在于：这种方法在微分方程中对坐标导数用初等运算来代替，并借助于熟知的一些方法将所得的对时间的常微分方程组连同给定的初始条件进行积分。

将变分原理应用于壳的非定常蠕变问题中，能够得到某些近似解。不过，只对比较简单的情况[5]才能有效地运用这个原理。根据流动假设求板壳的非定常蠕变问题解的

变分法，已在И. Г. Терегулов[46]的论著中研讨过。在他的论著[47]中，考察了板壳蠕变时的极限状态。

今后的研究

从我们对薄壳蠕变研究工作所作的综述和分析可以得出，人们对这一课题已经给以很大的注意。但是，由于壳蠕变的非线性理论方程的复杂性，所考察的解基本上属于最简单的轴对称问题。一些理论结果，在个别情况下才为实验所验证，实验工作相当落后于理论研究。

应该指出，在上述著作中，有一些作者是从各向同性材料的概念出发的，可是实验研究已查明[48]，很多材料在蠕变时是各向异性的。因而，另一些作者提出了考虑材料在蠕变时呈各向异性的物理关系的若干方案。可是，在目前的文献里还没有壳的各向异性蠕变方面的研究。

许多现代机器和动力设备的强度计算，都要求提出并解决这样一系列复杂的新课题，即在提高温度条件下的壳的应力-变形状态，其中包括考虑蠕变问题。这类问题计有：壳的非线性蠕变的轴对称二维问题；处于蠕变状态下的壳中孔洞附近的应力集中问题；考虑材料的各向异性；带孔壳因蠕变而断裂的问题等。解决诸如建立可解方程，拟定靠现代计算技术求解这种方程的数值方法这样一些问题，具有重大意义。在分析象带孔壳这样复杂的工程对象时，实验研究起着重要作用。

下述各篇研究著作，就是从上述观点来讲述壳的蠕变研究的。在[49—51]中，研究了各向同性壳的蠕变工程理论的基本方程和相依关系的推导。可解的非线性微分方程组，是以相对于力和挠度函数对称的混合形式以及位移形式导出来的。这些方程能够研究在实用上极其重要的广泛类型的壳（即扁壳和零高斯曲率壳）的非定常蠕变和定常蠕变。而且这些方程对于解决轴对称问题和非轴对称问题都是通用的。

在[52—55]中，提出并研究了各向异性壳的非线性蠕变的工程理论方案。可解方程是按混合形式建立的，并推出基本关系式。物理关系的结论，是以有可能将塑性数学理论中所熟知的一般方法转到研究复杂介质流变模型上的蠕变情况的推广作为基础的。在这种情况下，利用了耗散函数的概念和Циглер极值原理。有关计及各向异性的轴对称回转壳的蠕变问题，已经解决。

在[56]中，导出了非定常蠕变条件下的扁壳，在考虑初应变各向异性的非定常加载时的弹塑性变形可解方程。以得出的方程式作为基础，研究了一系列轴对称壳的蠕变问题[51,54,57,58]。

解壳蠕变非线性微分方程组的边界问题的一般算法，期待着电子计算机的应用，而且以利用各种迭代程序作为基础。迭代中的每一步长均用线性边界问题解出。以按照迭代程序类型线性边界问题因子的渐近化法来寻求非线性问题的解，主要取决于初始近似。经指出，把蠕变周期分解成随时间的单个阶段，使之每个阶段经几次迭代之后能找到它的解。从而缩短在电子计算机上解算问题的时间，保证按给定精度得出问题的解。

新的壳蠕变二维问题的提法和解算，已在[59]中给出。任意加载圆柱壳的解法是以位移方程作为基础的。研究了开口圆柱壳的非定常蠕变。所建立的算法证明了关于壳蠕变的非线性二维边界问题解法的有效性。

在[60]中，推出了长圆柱壳蠕变的半无矩理论的基本关系和可解方程。八阶非线性微分方程的解，是根据上述算法得出的。在已知蠕变函数条件下，对每次迭代的积分都是借助于布勃诺夫-伽辽金法完成的。关于盛有液态金属至某个水平的圆柱形管道的非定常蠕变的问题，是一个具有实际意义的研

究。搞清楚最大应力的松弛的实质，对评价持久强度是重要的。明确横截面周边随时间的变形，对应于由偶力矩应力状态所决定的截面平面。

蠕变状态下的壳中孔附近的应力集中问题，研究得不多，这个问题在[61,63]中提出并考察过。曾把由Г. Н. Савин提出的用于弹性壳的这个问题的一般方法推广到非线性蠕变问题上。同时，因为在该提法下的物理非线性，使问题归结为寻求壳中所产生的完全（不是附加的）力。在由含大可变性指数的应力状态所描述的等温非耦合坐标下，按混合形式推出两个非齐次非线性微分方程组。

在[64]中，根据Вольтер方程组型积分方程研究了有关蠕变壳中孔附近应力集中问题的一个解法。借用И. Н. Веку法，将问题的微分方程组化为复数域里的与之等价的非线性积分方程。对每一瞬时都用逐次近似法得出来。

顶盖被圆孔削弱的受内压的圆柱壳，在蠕变时的应力集中的非轴对称问题的解，已经得出来。经查明，这种壳虽有相当大的应力松弛，但它的应力集中直到定常期时仍然存在。按照强化假设和老化假设对各种情况所完成的计算证实：所建议的求壳在蠕变情况下的应力集中问题的解的方法，是十分有效而又可靠的。

加强孔对蠕变时的球壳的应力集中的影响，在[65]中探讨过。文中讲述了加强环的形状和横截面尺寸的影响。对于下列各种情况得出了切向应力集中系数和径向应力集中系数与时间的关系，即从自由孔到刚性加强孔，以及它同定常蠕变条件下的加强程度的关系。同时，求出符合于最小应力集中的横向环的面积尺寸。还得到了应力集中系数与内压值的相依关系。

在[66]中研究了材料在蠕变条件下的各向异性对壳中应力集中的影响。得出带有圆孔球壳中的应力集中问题的解答。经指出，符合周向“刚性”相对减少的材料各向异性程度增大，这将引起力在同一方向上的集中系数减小，而且使之逐渐地产生非常重要的重新分布。

被几个孔削弱的壳的蠕变分析，具有重大的实际意义。同时，在解决壳的非线性蠕变的多连域问题中，遇到相当大的困难。在[67--69]中得到了扁球壳与板的关于应力-应变状态分量改变率的非定常蠕变方程的综合方案，研究了算法并解算了球壳的多连域问题。把问题化成综合形式的基本积分方程的线性化的解，是用时步法完成的。构成算法的形式能用于应变率张量和应力张量之间的定常关系的任何蠕变理论的计算中。

在[70—72]中，讲述了受内压作用的蠕变状态下的圆柱壳，在孔附近的应变集中的实验研究。实验是用尺寸、材料、孔径、温度和载荷各不相同的壳制成的。经查明，蠕变时在孔区域内能观察到相当大的切向应变集中。这个集中域延伸到距孔周边达孔径3—4倍处，也就是带有局部特征。蠕变应变的增长率，在实验的头一小时特别高，以后随时间显著降低，其集中程度大致保持恒定。

壳蠕变时的应变集中的实验研究方法，是以利用显微网格作为基础的，而且保证测定应变的高精度。

今后研究的问题是：探讨被孔洞削弱的壳在考虑非定常加载下的非均匀加热的初始和变形的各向异性的蠕变；测定应力集中对这种壳持久强度的影响，及其蠕变条件下的断裂准则的表述；变厚度壳蠕变的非轴对称问题的解，考虑蠕变因素的带孔壳类型的最佳结构理论研究；建立适合于用电子计算机计算带孔壳类型的有效数值法；复杂复形状壳的蠕变和持久强度的实验研究。

参 考 文 献

1. Калладин К., Друкер Д. Вложенные поверхности постоянной скорости и диссипации энергии при ползучести. — «Механика», 1963, № 1 (77), с. 113—120.
2. Розенблюм В. И. Приближенные уравнения ползучести тонкостенных оболочек. — «Прикл. математика и механика», 1963, т. XXVII, вып. 1 с. 154—159.
3. Качанов Л. М. О вариационных методах решения задач теории пластичности. — «Прикл. математика и механика», 1959, т. XXIII, вып. 3, с. 616—617
4. Качанов Л. М. Теория ползучести. М., Физматгиз, 1960. 455 с.
5. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М., «Наука», 1966 752 с.
6. Терегулов И. Г. К вариационным методам решения задач установившейся ползучести пластин и оболочек в случае конечных перемещений. — «Прикл. математика и механика», 1962, т. 26, вып. 3, с. 492—496.
7. Терегулов И. Г. Изгиб и устойчивость тонких пластин и оболочек при ползучести. М., «Наука», 1969. 206 с.
8. Иванов Г. В. О соотношениях между скоростями деформаций и усилиями, моментами при установившейся ползучести пластин и оболочек. — «Механика твердого тела», 1968, № 2, с. 159—166.
9. Биргер И. А. Расчет конструкций с учетом пластичности и ползучести. — «Изв. АН СССР. Механика и машиностроение», 1965, № 2, с. 113—119.
10. Ильюшин А. А. Пластичность. М., Гостехиздат, 1948. 376 с.
11. Bailey R. W. Creep relationship and their application to pipes, tubes and cylindrical parts under internal pressure. — «Proc. Inst. Mech. Engrs.», 1951, vol. 164, p. 425—431.
12. Розенблюм В. И. Расчеты некоторых деталей турбин в условиях ползучести. — «Котлотурбостроение», 1951, № 4, с. 7—10.
13. Качанов Л. М. Ползучесть овальных разностенных труб. — «Изв. АН СССР. ОТН», 1956, № 7.
14. Малинин Н. Н. Расчеты на ползучесть. — В кн.: Расчеты на прочность в машиностроении. Т. II. М., Машгиз, 1958, с. 813—953.
15. Волчков Ю. М. Осесимметричные задачи ползучести круговых цилиндрических оболочек. — «Изв. АН СССР. Механика», 1965, № 5, с. 118—121.
16. Bieniek M. P., Freudental A. M. Creep deformation and stresses in pressurized long cylindrical shells. — «Aero/Space Sci.», 1960, vol. 27, N 10, p. 763—766.
17. Calladine C. R. Edge — load response of a thin cylindrical shell in creep — «Bull. Acad. polon. sci. ser. sci. techn.», 1964, vol. 12, N 11 a, p. 33.
18. Стасенко И. В. Осесимметричная задача установившейся ползучести цилиндрической оболочки. — «Журн. прикл. механики и теорет. физики», 1962, № 6, с. 115—117.
19. Стасенко И. В. Установившаяся ползучесть трубы в зоне жесткого фланца. — «Вестн. машиностроения», 1963, № 6, с. 6—8.
20. Зверьков Б. В. Ползучесть труб, нагруженных внутренним давлением и крутящим моментом. — «Теплоэнергетика», 1959, № 8, с. 53—57.
21. Calladine C. R. The steady creep of shells: a method of analysis. Nuclear Reactor Containment Buildings and Pressure Vessels. — «Proc. Symp.», Glasgow, Butterworths, London, 1960, p. 411—431.
22. Calladine C. R. On the creep of a wrinkle. Creep in structures. — «Springer Verlag». Berlin, 1962, p. 245—271.
23. Gemma A. E. The creep deformation of symmetrically loaded circular cylindrical shell. — «Aero/Space Sci.», 1960, vol. 27, N 12, p. 953—954.
24. Prager W. Linearisation in visco-plasticity. — «Oesterreichisches Ingenieur — Archiv», 1961, vol. 15, p. 152—157.
25. Cozarelli F. A., Patel S. A. Creep deformation in membrane shells. — «J. Franklin Inst.», 1964, vol. 278, N 1, p. 45—60.
26. Gemma A. E., Warfield J. T. The creep deformation of symmetrically loaded shells. — «J. Aero/Space Sci.», 1961, vol. 28, N 6, p. 507—508.
27. Шаблий О. Н. Об установившейся ползучести осесимметрично нагруженных круглых и кольцевых пластинок и пологих сферических оболочек. — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 1. Харьков, 1965, с. 90—106.
28. Шаблий О. Н., Данчак П. И. Об установившейся ползучести оболочек вращения в случае критерия Треска. — «Прикл. механика», 1972, т. VIII, вып. 5, с. 13—20.
29. Данилов В. И. Ползучесть конической оболочки в зоне краевого эффекта. — В кн.: Исследования по теории пластин и оболочек. Казань. 1964, № 2, с. 175—178.
30. Onat E. T., Yüksel N. On the steady creep of shells. — «ASME». N. Y., 1958, p. 625—630.
31. Мазалов В. Н., Немировский Ю. В. Ползучесть цилиндрических оболочек. — «Тр. VI всесоюзн. конф. по теории пластин и оболочек», М., «Наука», 1966, с. 554—560
32. Розенблюм В. И. Приближенный анализ неустановившейся ползучести пластин и оболочек. — В кн.: Исследования по упругости и пластичности. Л., 1964, № 3, с. 88—95.
33. Киракосян Р. М. Релаксационная задача безмоментных оболочек вращения. — «Изв. АН Арм. ССР. Сер. физ.-мат. наук», 1962, т. 15, № 3, с. 71—76.
34. Розенблюм В. И. О неустановившейся ползучести безмоментных оболочек. — «Журн. прикл. механики и теорет. физики», 1960, № 4, с. 82—84.
35. Работнов Ю. Н. Неустановившаяся ползучесть оболочек. — Тр. VI всесоюзн. конф. по теории пластин и оболочек», М., «Наука», 1966, с. 646—649.
36. Куратов П. С., Розенблюм В. И. Об интегрировании уравнений неустановившейся ползучести твердых тел. — «Прикл. математика и механика», 1960, т. XXIV, вып. 1, с. 146—148.
37. Биргер И. А. Круглые пластинки и оболочки вращения. М., Оборонгиз, 1961, 367 с.
38. Куратов П. С., Левченко А. И. Неустановившаяся ползучесть тонкостенных оболочек. — В кн.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. 4. Киев, 1964, с. 241—249.
39. Poritsky N. Effect of creep on stresses in a cylindrical shells. Creep in structures. — «Springer-Verlag». Berlin, 1962, p. 229—244.
40. Демьянушко И. В. Пластичность и ползучесть пологих оболочек вращения. — «Изв. АН СССР. Механика твердого тела», 1970, № 2, с. 102—120.
41. Стасенко І. В. Повзучість циліндричної оболонки в зоні крайового ефекту. — «Прикл. механіка», 1962, т. VIII, вип. 6, с. 670—675.
42. Супрун А. Д. Приближенное интегрирование уравнений неустановившейся ползучести — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 13. Харьков, 1971, 10—12.
43. Биддерман В. Л. Применение метода прогонки для численного решения задач строительной механики. — «Механика твердого тела», 1967, № 5, с. 62—66
44. Годунов С. К. О численном решении краевых задач для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений. — «Усп. матем. наук», 1961, т. XVI, вып. 3(99), с. 171—174.
45. Гурьев Н. Г. Осесимметричная неустановившаяся ползучесть круговых цилиндрических оболочек. — «Изв. АН СССР. Механика твердого тела», 1971, № 1, с. 38—41.
46. Терегулов И. Г. Неустановившаяся ползучесть тонких пластин и оболочек при малых перемещениях. — «Прикл. математика и механика», 1962, № 4, с. 730—735.
47. Терегулов И. Г. О предельном состоянии пластин и оболочек при ползучести. — «Тр. VI всесоюзн. конф. по теории пластин и оболочек», М., «Наука», 1966, с. 729—733.
48. Соснин О. В. Об анизотропной ползучести материалов. — «Журн. прикл. механики и теорет. физики», 1965, № 6, с. 99—104.
49. Бурлаков А. В. К вопросу об основных уравнениях моментной теории ползучести пологих оболочек. — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 1. Харьков, 1965, с. 79—85.
50. Бурлаков А. В. Основные уравнения технической теории ползучести тонких оболочек. — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 13. Харьков, 1971, с. 3—9.
51. Бурлаков А. В. Уравнения технической теории ползучести оболочек в перемещениях. — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 15. Харьков, 1972, с. 25—32
52. Бурлаков А. В., Морачковский О. К. Об одном варианте теории анизотропной ползучести материалов. — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 16. Харьков, 1972, с. 79—84.
53. Бурлаков А. В., Морачковский О. К. О деформационной и начальной анизотропии при ползучести. — «Проблемы прочности», 1973, № 6, с. 77—79.
54. Бурлаков А. В., Морачковский О. К., Супрун А. Д. Ползучесть осесимметричных оболочек вращения с учетом анизотропии. — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 17. Харьков, 1973, с. 79—84
55. Бурлаков А. В., Морачковский О. К. Изотропная и анизотропная ползучесть тонких оболочек — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 20. Харьков, 1974, с. 93—98.
56. Морачковский О. К. Анизотропная ползучесть оболочек при нестационарном нагружении — «Тр. X всесоюзн. конф. по теории оболочек и пластин». Т. 1, Тбилиси, «Мецниереба», 1975, с. 470—477.
57. Бурлаков А. В., Морачковский О. К. Ползучесть осесимметрично нагруженной цилиндрической оболочки. — В кн.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. 11. Киев, 1971, с. 148—151.
58. Бурлаков А. В., Морачковский О. К. Неустановившаяся ползучесть цилиндрических оболочек. — «Изв. вузов. Машиностроение», 1972, № 12, с. 41—44.
59. Бурлаков А. В., Морачковский О. К. Ползучесть неосесимметричных цилиндрических оболочек. — «Прикл. механика», 1974, т. X, вып. 8, с. 31—35.
60. Бурлаков А. В. Полубезмоментная теория ползучести длинных цилиндрических оболочек. — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 21. Харьков, 1975, с. 33—37.
61. Бурлаков А. В. Концентрация напряжений около отверстия на поверхности цилиндра в условиях ползучести. — «Тр. Харьк. политехн. ин-та», 1958, т. 14, с. 59—70.
62. Бурлаков А. В. О концентрации напряжений в тонких оболочках, ослабленных отверстием, при ползучести — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 16. Харьков, 1972, с. 24—29.
63. Бурлаков А. В. Концентрация напряжений около отверстий в тонких оболочках в условиях ползучести — В кн.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. 11. Киев, 1974, с. 37—41.
64. Бурлаков А. В., Львов Г. И. К вопросу о концентрации напряжений в оболочках при ползучести. — «Прикл. механика», 1975, т. XI, вып. 2, с. 34—40.
65. Бурлаков А. В., Львов Г. И. Влияние нелинейной ползучести на концентрацию напряжений в сферической оболочке около подкрепленного отверстия. — «Проблемы прочности», 1974, № 11, с. 28—30.
66. Бурлаков А. В., Морачковский О. К. Некоторые задачи изотропной и анизотропной ползучести тонких оболочек. — «Тр. IX всесоюзн. конф. по теории оболочек и пластин». Л., «Судостроение», 1975, с. 309—312.
67. Бурлаков А. В., Львов Г. И. Задачи нелинейной ползучести пологих сферических оболочек и пластин для многосвязных областей. — «Тр. X всесоюзн. конф. по теории оболочек и пластин». Т. I. Тбилиси, «Мецниереба», 1975, с. 329—336.
68. Бурлаков А. В., Львов Г. И. Задачи нелинейной ползучести пологих сферических оболочек и пластин для многосвязных областей. — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 21. Харьков, 1975, с. 19—25.
69. Львов Г. И. Ползучесть сферической оболочки, ослабленной двумя круговыми отверстиями. — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 22 Харьков, 1975, с. 77—80.
70. Бурлаков А. В. Ползучесть и разрушение цилиндрических оболочек с отверстиями. — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 11 Харьков, 1970, с. 20—23
71. Бурлаков А. В., Львов Г. И. Экспериментальное исследование ползучести сферической оболочки, ослабленной двумя круговыми отверстиями. — В кн.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. 15 Киев. 1975, с. 87—89.
72. Бурлаков А. В., Пушкин Н. И. Экспериментальная установка для изучения концентрации напряжений в цилиндрических оболочках при ползучести. — В кн.: Динамика и прочность машин. Вып. 2. Харьков. 1966 с. 128—140.

王嘉新译自：Бурлаков А. В. (1977), Ползучесть тонких оболочек, сб. Динамика и прочность машин, вып. 26, «Вища школа», 3—16。(常振檝 校)