

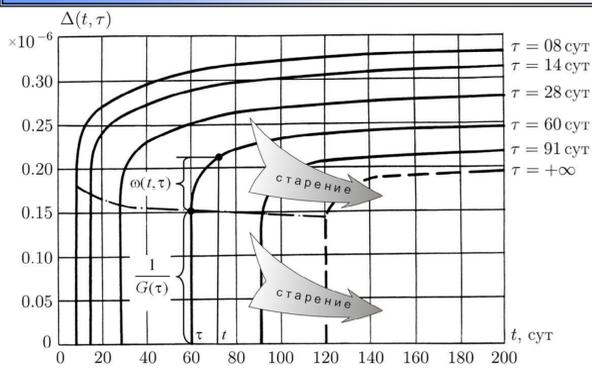


Д.А. Паршин

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СООРУЖАЕМЫХ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С РЕОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ*

*Работа выполнена в рамках госзадания АААА-А20-120011690132-4

Описание поведения используемого материала



$$\Delta(t, \tau) = \frac{1}{G(\tau)} + \omega(t, \tau)$$

$G(t)$ - упругий модуль сдвига
 $\omega(t, \tau)$ - мера ползучести при чистом сдвиге
 ν - коэффициент Пуассона
 $\varkappa = (1 - 2\nu)^{-1}$

$$\mathbf{T}(\mathbf{r}, t) = G(t)(\mathbf{I} + \mathcal{N}_{\tau_0(\mathbf{r})})[2\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + (\varkappa - 1)\mathbf{1} \operatorname{tr} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)]$$

$$\mathbf{I} + \mathcal{N}_s = (\mathbf{I} - \mathcal{L}_s)^{-1}$$

$$\mathcal{L}_s f(t) = \int_s^t f(\tau) K(t, \tau) d\tau, \quad \mathcal{N}_s f(t) = \int_s^t f(\tau) R(t, \tau) d\tau,$$

$$K(t, \tau) = G(\tau) \partial \Delta(t, \tau) / \partial \tau, \quad \Delta(t, \tau) = G(\tau)^{-1} + \omega(t, \tau)$$

$\tau_0(\mathbf{r})$ - момент появления напряжений в точке \mathbf{r} ← принципиально для процессов наращивания материала

Используемый в работе математический аппарат



Общая постановка неклассической начально-краевой задачи для кусочно-непрерывно растущего стареющего вязкоупругого тела, сформулированная и исследованная профессором А.В. Манжировым

♦ Дифференциальное уравнение:
 $\nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{h} - \theta(\tau^*(\mathbf{x})/t_1 - 1)\mathbf{h}_1 - \delta(\tau^*(\mathbf{x})/t_1 - 1)\mathbf{h}_2 = \mathbf{0};$
 $\mathbf{S} = 2\mathbf{D} + (\kappa - 1)\mathbf{I}_1(\mathbf{D})\mathbf{1}, \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2}[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T]$

♦ Краевые условия на неподвижных поверхностях:
 $\mathbf{x} \in S_1(t): \mathbf{n} \cdot \mathbf{S} = \mathbf{w}_0,$
 $\mathbf{x} \in S_2(t): \mathbf{v} = \mathbf{v}_0,$
 $\mathbf{x} \in S_3(t): \mathbf{nn} \cdot \mathbf{v} = v_1, \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{S} - \mathbf{n} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{nn} = \mathbf{w}_1,$
 $\mathbf{x} \in S_4(t): \mathbf{n} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{nn} = \mathbf{w}_2, \quad \mathbf{v} - \mathbf{nn} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{v}_2,$

♦ Краевое условие на поверхности роста:
 $\mathbf{x} \in S^*(t): \mathbf{n} \cdot \mathbf{S} = [\nabla \cdot \mathbf{T}^*(\mathbf{x})/G(t) + \mathbf{f}(\mathbf{x}, \tau^*(\mathbf{x}))/G(t) - \theta(\tau^*(\mathbf{x})/t_1 - 1)\mathbf{f}_1^0(\mathbf{x}, t) - \delta(\tau^*(\mathbf{x})/t_1 - 1)\mathbf{f}_2^0(\mathbf{x}, t)]\mathbf{s}_n,$

♦ Начальное условие на напряжения в присоединяемом материале:
 $t = \tau^*(\mathbf{x}): \mathbf{T} = \mathbf{T}^*$

\mathbf{T} - тензор напряжений
 \mathbf{S} - тензор скоростей операторных напряжений
 \mathbf{D} - тензор скоростей деформации
 \mathbf{v} - вектор скорости
 $\theta(t)$ - функция Хевисайда
 $\delta(t)$ - функция Дирака
 t_1 - момент начала роста
 $\tau^*(\mathbf{x})$ - момент присоединения частицы \mathbf{x}
 \mathbf{n} - единичная внешняя нормаль
 \mathbf{s}_n - нормальная скорость движения поверхности роста
 \mathbf{v}_k - заданные скорости
 \mathbf{w}_k - сложный образом определяются по заданным поверхностным нагрузкам
 $\mathbf{f}_k^0, \mathbf{h}_k, \mathbf{h}$ - сложный образом определяются по заданным объемным силам
 $\kappa = (1 - 2\nu)^{-1}$
 ν - коэффициент Пуассона
 $G(t)$ - упругий модуль сдвига

Особенности механики исследуемых процессов

С одной стороны:

Используемый материал проявляет реологические свойства

Происходит постепенное перераспределение напряжений с уже сформированной части тела на вновь присоединяемый материал

Растущее тело (в целом) характеризуется отсутствием ненапряженной конфигурации

Невозможно ввести стандартным образом меры деформации (т.е. в растущем теле деформации несовместны)

С другой стороны:

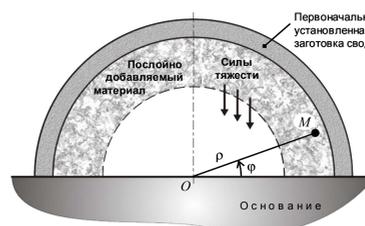
Дополнительный материал присоединяется к поверхности растущего тела

Постоянно осуществляется дополнительное нагружение всего формируемого тела

за счет нагрузок, действующих на дополнительные материальные слои и начальных напряжений, возникающих в дополнительных материальных слоях

однако Можно перейти к скоростям изменения характеристик НДС с течением времени

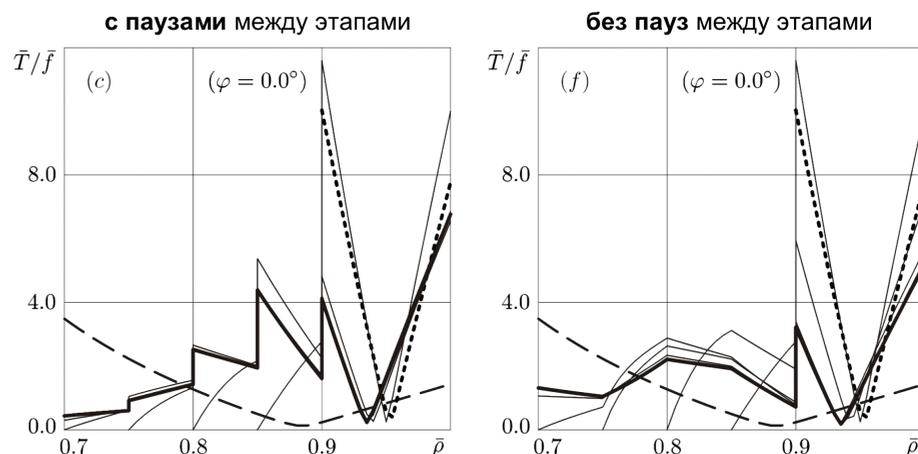
Схема послойного сооружения тяжелой сводчатой конструкции



- учет действия сил тяжести на протяжении всего процесса сооружения
- жесткое горизонтальное основание, скользящая заделка подошв свода
- плоское деформированное состояние сооружаемого свода

Результаты математического моделирования: сооружение свода за несколько этапов наращивания материала

f - удельный вес, T - интенсивность касательных напряжений (правая подошва свода)



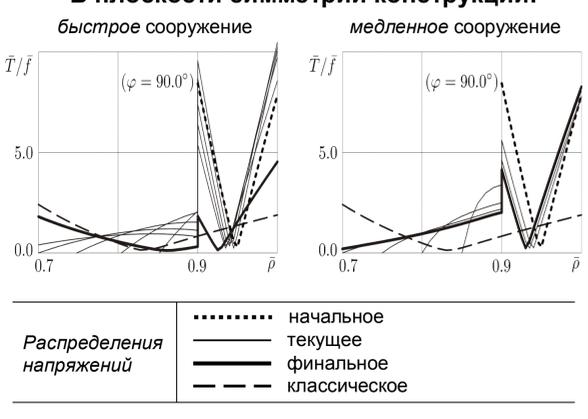
Распределения напряжений:
 начальное (в установленной заготовке до начала ее наращивания)
 — текущее (в процессе наращивания свода)
 — финальное (установившееся в итоге после окончания наращивания)
 - - - классическое (в ненаращиваемом своде тех же размеров)

Результаты выполненного моделирования демонстрируют возможности технологического управления НДС конструкции за счет надлежащего варьирования темпа ее сооружения. В частности, возможен подбор такой программы сооружения, при которой удастся ощутимо снизить первоначально возникшие высокие напряжения в конструкции (вследствие ее малой прочности на начальной стадии сооружения), не превысив при этом в течение всего процесса сооружения определенный допустимый уровень действующих во всей конструкции растягивающих и сдвиговых напряжений.

Управление напряженным состоянием конструкции с помощью варьирования скорости наращивания материала

f - удельный вес, T - интенсивность касательных напряжений, σ_1 - наибольшее нормальное напряжение

В плоскости симметрии конструкции:



Распределения напряжений:
 начальное
 — текущее
 — финальное
 - - - классическое

— быстрое сооружение
 — медленное сооружение
 — комбинированный скоростной режим

Во всей конструкции:

