Расчет строительных конструкций

К ДЕФОРМАЦИОННОМУ РАСЧЕТУ РАМ ИЗ НЕУПРУГИХ СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.А.РОЧЕВ, *канд. техн. наук, доцент*
Петрозаводский государственный университет
185026, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Комсомольский, дом 15, кв. 120. Электронный адрес: metalll@bk.ru.

В работе решена задача деформационного расчета сжато-изогнутых рам из неупругих составных элементов, имеющих переменное поперечное сечение и переменную жесткость связей сдвига по длине. В основу решения положена теория упругих составных стержней А.Р. Ржаницына. Статическая неопределимость рам раскрыта методом деформаций. Реакции во введенных связях определены с помощью метода начальных параметров. Жесткость составных элементов определена с использованием выражения для определения эквивалентного модуля деформаций, ранее полученного автором, который учитывает сжимаемость ветвей, деформации сдвига материала ветвей, составляющих стержень, развитие неупругих деформаций в них.
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сжато-изогнутая рама, деформационный расчет, эквивалентный модуль деформаций.

Исследуются неупругие рамные системы, включающие в себя составные элементы, имеющие переменное поперечное сечения и переменную жесткость связей на сдвиг по длине элементов.

В работе используются основные положения общей теории упругих составных стержней, разработанной А.Р. Ржаницыным [2]. Для материала ветвей и связей между ветвями устанавливается произвольная зависимость между деформациями и напряжениями. Применяется гипотеза о нелинейно - упругом материале. Раскрытие статической неопределимости рамной системы осуществляется методом деформаций с учетом влияния продольных сил, возникающих в элементах при деформировании рам под действием нагрузки.

Для определения перемещений плоской рамы элементы многоконтурного стержня рамы делятся по длине на участки постоянной жесткости (в общем случае неравные) длиной l_j между узловыми точками j и $j + 1$. В узлы элементов рамы вводятся дополнительные моментные $1j$ и силовые $2j$ связи, препятствующие их перемещениям. Многоконтурный стержень рамы с введенными связями образует основную систему метода деформаций. Расчет такой рамы производится шаговым методом [1].

Для определения реакций во введенных связях j-й участок элемента рамы рассматривается как жестко защемленный по концам составной стержень длиной l_j или стержень, защемленный на одном конце и шарнирно опертый на другом конце. Дифференциальное уравнение изгиба упругого двухветвевого ($n = 2$) составного стержня было получено в [2]. При работе за пределом упругости уравнение для j-го участка стержня рамы, в котором действует продольная сила $N_j^{(i)}$, на i-м шаге загружения, будет иметь вид

$$v_j^{IV(i)} + v_j''^{(i)}(N_j^{(i)} / C_{xj}^{equ(i)} - \lambda_j^{2(i)}) - v_j^{(i)} N_j^{(i)} \lambda_j^{2(i)} / C_{oj}^{(i)} - \\ - \lambda_j^{2(i)} M_{cj}^{(i)} / C_{oj}^{(i)} + M_{xj}^{(i)} / C_{xj}^{equ(i)} = 0, \quad (1)$$

где $v_j^{(i)}$ - прогибы j-го участка стержня рамы на i-м шаге нагружения; $M_{cj}^{(i)}$ - изгибающий момент в составном стержне, как в монолитном; $M_{xj}^{(i)}$ - изгибающий момент в составном стержне, лишенном связей сдвига; $C_{xj}^{equ(i)}$ - суммарная эквивалентная жесткость ветвей составного элемента на на j-м участке элемента рамы при i-м шаге нагружения равная

$$C_{xj}^{equ(i)} = \sum_{\upsilon=1}^{n} (E_{j\upsilon}^{equ(i)} J_{xj\upsilon}), \tag{2}$$

здесь $E_{j\upsilon}^{equ(i)}$ - эквивалентный модуль деформаций для сечений υ -й ветви j-го участка элемента рамы на i-м шаге нагружения; $J_{xj\upsilon}$ - момент инерции поперечного сечения υ-й ветви постоянный по длине j-го участка элемента рамы; $C_{oj}^{(i)}$ - приведенная жесткость сечения j-го участка элемента рамы, как монолитного, на i-м шаге нагружения равная

$$C_{oj}^{(i)} = C_{xj}^{equ(i)} + E_{cj1}^{(i)} A_{j1} E_{cj2}^{(i)} A_{j2} c_j^2 / (\sum_{\upsilon=1}^{n} (E_{cj\upsilon}^{(i)} A_{j\upsilon}), \tag{3}$$

здесь A_{j1} и A_{j2} - площадь поперечного сечения ветвей 1 и 2 j-го участка элемента рамы; c_j - расстояние между центрами тяжести ветвей составного элемента; $E_{cj1}^{(i)}$ и $E_{cj2}^{(i)}$ - секущие модули деформаций осевых волокон ветвей 1 и 2 на i-м шаге нагружения;

$$\lambda_j^{(i)} = \sqrt{\xi_j^{(i)} [\sum_{\upsilon=1}^{n} (1/(E_{cj\upsilon}^{(i)} A_{j\upsilon}) + c_j^2 / C_{xj}^{equ(i)}]}, \tag{4}$$

здесь $\xi_j^{(i)}$ - коэффициент жесткости продольных связей сдвига на j-м участке элемента рамы при i-м шаге нагружения.

Величина $E_{j\upsilon}^{equ(i)}$ в (2) определяется по формуле, полученной ранее автором статьи, опубликованной в [3] и использованной в [4]

$$E_{j\upsilon}^{equ(i)} = \frac{M_{xj\upsilon}^{(i-1)} h_{j\upsilon} (1 - \varepsilon_{oj\upsilon}^{(i-1)})}{(\Delta\bar{\varepsilon}_{j\upsilon}^{(i-1)} - \gamma_{1j\upsilon}^{(i-1)} h_{j\upsilon} Q_{yj\upsilon}'^{(i-1)}) J_{xj\upsilon}}, \tag{5}$$

где $M_{xj\upsilon}^{(i-1)}$ - наибольший изгибающий момент, действующий в сечении υ -й ветви j-го участка элемента рамы на $(i-1)$-м шаге нагружения; $h_{j\upsilon}$- высота поперечного сечения υ-ой ветви j-го участка элемента рамы; $\varepsilon_{oj\upsilon}^{(i-1)}$ - линейная деформация оси υ-й ветви j-го участка элемента рамы на $(i-1)$-м шаге нагружения; $\Delta\varepsilon_{j\upsilon}^{(i-1)} = \varepsilon_{1j\upsilon}^{(i-1)} - \varepsilon_{2j\upsilon}^{(i-1)}$; $\varepsilon_{1j\upsilon}^{(i-1)}$ и $\varepsilon_{2j\upsilon}^{(i-1)}$ - краевые линейные деформации в волокнах поперечного сечения υ-й ветви j-го участка элемента рамы, возникающие в соответствии с гипотезой плоских сечений на $(i-1)$-м шаге нагружения; ; $\gamma_{1j\upsilon}^{(i-1)}$ - угол сдвига υ-й ветви на j-м участке элемента рамы от единичной поперечной силы при $(i-1)$-м шаге нагружения; $Q_{yj\upsilon}'^{(i-1)}$ - первая производная от поперечной силы, действующей υ-ой ветви j-го участка элемента рамы при $(i-1)$-м шаге нагружения.

Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$v_j^{(i)}=\overline{C}_{1j}^{(i)}e^{(-k_{1j}^{(i)}z_j)}+\overline{C}_{2j}^{(i)}e^{(k_{1j}^{(i)}z_j)}+\overline{C}_{3j}^{(i)}e^{(-k_{2j}^{(i)}z_j)}+ \\ +\overline{C}_{4j}^{(i)}e^{(k_{2j}^{(i)}z_j)}+(M_{jo}^{(i)}-Q_{jo}^{(i)}z_j)/N_j^{(i)}, \qquad (6)$$

где

$$(k_{1j}^{(i)})^2=\frac{-N_j^{(i)}+\lambda_j^{2(i)}C_{xj}^{equ(i)}}{2C_{xj}^{equ(i)}}- \\ -\frac{\sqrt{N_j^{2(i)}-2N_j^{(i)}\lambda_j^{2(i)}C_{xj}^{equ(i)}+\lambda_j^{2(i)}(C_{xj}^{equ(i)})^2[\lambda_j^{2(i)}+4N_j^{(i)}]/C_{oj}^{(i)})}}{2C_{xj}^{equ(i)}}, \qquad (7)$$

$$(k_{1j}^{(i)})^2=\frac{-N_j^{(i)}+\lambda_j^{2(i)}C_{xj}^{equ(i)}}{2C_{xj}^{equ(i)}}+ \\ +\frac{\sqrt{N_j^{2(i)}-2N_j^{(i)}\lambda_j^{2(i)}C_{xj}^{equ(i)}+\lambda_j^{2(i)}(C_{xj}^{equ(i)})^2[\lambda_j^{2(i)}+4N_j^{(i)}]/C_{oj}^{(i)})}}{2C_{xj}^{equ(i)}}. \qquad (8)$$

В формуле (6) $M_{jo}^{(i)}$ и $Q_{jo}^{(i)}$ - соответственно изгибающий момент и поперечная сила в j-м узле j-го участка стержня рамы (в сечении $z_j = 0$) при отсутствии на нем поперечной нагрузки. Производные от функции прогибов будут иметь вид

$$v_j'^{(i)}=(\overline{C}_{1j}^{(i)}e^{(-k_{1j}^{(i)}z_j)}+\overline{C}_{2j}^{(i)}e^{(k_{1j}^{(i)}z_j)})k_{1j}^{(i)}\ln(e)- \\ -(\overline{C}_{3j}^{(i)}e^{(-k_{2j}^{(i)}z_j)}-\overline{C}_{4j}^{(i)}e^{(k_{2}^{(i)}z_j)})k_{2j}^{(i)}\ln(e)-Q_{jo}^{(i)}/N_j^{(i)},$$

$$v_j''^{(i)}=(\overline{C}_{1j}^{(i)}e^{(-k_{1j}^{(i)}z_j)}+\overline{C}_{2j}^{(i)}e^{(k_{1j}^{(i)}z_j)})k_{1j}^{2(i)}\ln(e)^2- \\ -(\overline{C}_{3j}^{(i)}e^{(-k_{2j}^{(i)}z_j)}-\overline{C}_{4j}^{(i)}e^{(k_{2}^{(i)}z_j)})k_{2j}^{2(i)}\ln(e)^2, \qquad (9)$$

$$v_j'''^{(i)}=(\overline{C}_{1j}^{(i)}e^{(-k_{1j}^{(i)}z_j)}+\overline{C}_{2j}^{(i)}e^{(k_{1j}^{(i)}z_j)})k_{1j}^{3(i)}\ln(e)^3-(\overline{C}_{3j}^{(i)}e^{(-k_{2j}^{(i)}z_j)}-\overline{C}_{4j}^{(i)}e^{(k_{2}^{(i)}z_j)})k_{2j}^{3(i)}\ln(e)^3,$$

$$v_j^{1V(i)}=(\overline{C}_{1j}^{(i)}e^{(-k_{1j}^{(i)}z_j)}+\overline{C}_{2j}^{(i)}e^{(k_{1j}^{(i)}z_j)})k_{1j}^{4(i)}\ln(e)^4-(\overline{C}_{3j}^{(i)}e^{(-k_{2j}^{(i)}z_j)}-\overline{C}_{4j}^{(i)}e^{(k_{2}^{(i)}z_j)})k_{2j}^{4(i)}\ln(e)^4.$$

Используем метод начальных параметров. При $z_j = 0$ из (9) имеем

$$v_{jo}^{(i)}=C_{1j}^{(i)}+C_{2j}^{(i)}+C_{3j}^{(i)}+C_{4j}^{(i)}+M_{jo}^{(i)}/N_j^{(i)},$$

$$v_{jo}'^{(i)}=-u_j^{(i)}(C_{1j}^{(i)}-C_{2j}^{(i)})-v_j^{(i)}(C_{3j}^{(i)}-C_{4j}^{(i)})-Q_{jo}^{(i)}/N_j^{(i)},$$

$$v_{jo}''^{(i)}=u_j^{2(i)}(C_{1j}^{(i)}+C_{2j}^{(i)})+v_j^{2(i)}(C_{3j}^{(i)}+C_{4j}^{(i)}), \qquad (10)$$

$$v_{jo}'''^{(i)}=-u_j^{3(i)}(C_{1j}^{(i)}-C_{2j}^{(i)})-v_j^{3(i)}(C_{3j}^{(i)}-C_{4j}^{(i)}),$$

$$y_{jo}^{1V(i)}=u_j^{4(i)}(C_{1j}^{(i)}+C_{2j}^{(i)})+v_j^{4(i)}(C_{3j}^{(i)}+C_{4j}^{(i)}),\ \text{где}\ u_j^{(i)}=k_{1j}^{(i)}\ln(e),\ v_j^{(i)}=k_{2j}^{(i)}\ln(e).$$

Решая систему (10) получаем

$$\overline{C}_{1j}^{(i)}=\frac{v_j^{2(i)}(u_j^{(i)}v_{jo}^{(i)}+v_{jo}'^{(i)}-u_j^{(i)}M_{jo}^{(i)}/N_j^{(i)}-Q_{jo}^{(i)}/N_j^{(i)})+u_j^2v_{jo}''^{(i)}+v_{jo}'''^{(i)}}{2u_j^{(i)}(v_j^{2(i)}-u_j^{2(i)})},$$

$$\overline{C}_{2j}^{(i)}=\frac{v_j^{2(i)}(u_j^{(i)}v_{jo}^{(i)}+v_{jo}'^{(i)}-u_j^{(i)}M_{jo}^{(i)}/N_j^{(i)}+Q_{jo}^{(i)}/N_j^{(i)})-u_j^{(i)}v_{jo}''^{(i)}-v_{jo}'''^{(i)}}{2u_j^{(i)}(v_j^{2(i)}-u_j^{2(i)})},$$

$$\overline{C}_{3j}^{(i)}=\frac{u_j^{2(i)}(v_j^{(i)}v_{jo}^{(i)}+v_{jo}'^{(i)}-v_j^{(i)}M_{jo}^{(i)}/N_j^{(i)}-Q_{jo}^{(i)}/N_j^{(i)})+v_j^{(i)}v_{jo}''^{(i)}+v_{jo}'''^{(i)}}{2v_j^{(i)}(v_j^{2(i)}-u_j^{2(i)})},$$

$$\overline{C}_{4j}^{(i)}=\frac{u_j^{2(i)}(v_j^{(i)}v_{jo}^{(i)}+v_{jo}'^{(i)}-v_j^{(i)}M_{jo}^{(i)}/N_j^{(i)}+Q_{jo}^{(i)}/N_j^{(i)})-v_j^{(i)}v_{jo}''^{(i)}-v_{jo}'''^{(i)}}{2v_j^{(i)}(v_j^{2(i)}-u_j^{2(i)})}. \qquad (11)$$

Подставляя (11) в (9) получаем систему линейных уравнений, которая в матричной форме будет иметь вид

$$\boldsymbol{AZ}=\boldsymbol{B}, \qquad (12)$$

где $\boldsymbol{A}$ - квадратная матрица коэффициентов при неизвестных в системе уравнений; $\boldsymbol{Z}$ - вектор неизвестных усилий; $\boldsymbol{B}$ - вектор свободных членов системы уравнений. При повороте на угол равный $\varphi=1$ дополнительной моментной связи в узле $(j+1)$ j-го участка стержня рамы вектор $\boldsymbol{B}$ будет включать следующие элементы

$$\boldsymbol{B}=[0,\ \varphi,\ 0], \qquad (13)$$

а вектор $\boldsymbol{Z}$:

$$\boldsymbol{Z}=[M_{jo}^{(i)},\ Q_{jo}^{(i)},\ \tau_{jo}^{(i)}]. \qquad (14)$$

При этом граничные условия для концов защемленного j-го участка стержня рамы (в случае свободно сдвигающихся торцов) будут иметь вид

$$v_{jo}^{(i)}=0,\ \ v_{jo}'^{(i)}=0\ \ v_{jo}''^{(i)}=M_{jo}^{(i)}/C_{xj}^{equ(i)},\ \ v_{jo}'''^{(i)}=(\tau_{jo}^{(i)}c-Q_{jo}^{(i)})/C_{xj}^{equ(i)},\ \ T_{jo}^{(i)}=0,$$

$$v_{j,lj}^{(i)}=0,\ \ v_{j,lj}'^{(i)}=\varphi,\ \ v_{jl}''^{(i)}=(M_{jo}^{(i)}-Q_{jo}^{(i)}l_j)/C_{xj}^{equ(i)},\ \ T_{jl}^{(i)}=0, \qquad (15)$$

где $T_{jo}^{(i)}$ и $T_{lj}^{(i)}$ - суммарные сдвигающие усилия в шве j-го участка составного стержня рамы по его концам; $\tau_{jo}^{(i)}$ - погонное сдвигающее усилие в связях сдвига в j-м узле j-го участка составного стержня рамы.

С учетом (11) и (15) уравнения (9) дают систему линейных алгебраических уравнений типа (12), в которой матрица $\boldsymbol{A}$ будет включать нижеследующие элементы

$$A_{11j}^{(i)}=(-V_{1j}^{(i)}e_{1j}^{(i)}+U_{1j}^{(i)}e_{2j}^{(i)})/w_j^{(i)}+1/N_j^{(i)},$$

$$A_{12j}^{(i)}=(-V_{1j}^{(i)}u_j^{-1(i)}e_{1j}^{(i)}+U_{1j}^{(i)}v_j^{-1(i)}e_{2j}^{(i)})/w_j^{(i)}-l_j/N_j^{(i)},$$

$$A_{13j}^{(i)}=c(u_j^{-1(i)}e_{3j}^{(i)}-v_j^{-1(i)}e_{4j}^{(i)})/C_{xj}^{equ(i)}w_j^{(i)},\ \ A_{21j}^{(i)}=(V_{1j}^{(i)}u_j^{(i)}e_{3j}^{(i)}-U_{1j}^{(i)}v_j^{(i)}e_{2j}^{(i)})/w_j^{(i)},$$

$$A_{22j}^{(i)}=(V_{1j}^{(i)}e_{1j}^{(i)}-U_{1j}^{(i)}e_{2j}^{(i)})/w_j^{()i}-1/N_j^{(i)},$$

$$A_{23j}^{(i)}=-c(e_{1j}^{(i)}-e_{2j}^{(i)})/C_{xj}^{equ(i)}w_j^{(i)}/N_j^{(i)},$$

$$A_{31j}^{(i)}=(-V_{1j}^{(i)}u_j^{2(i)}e_{3j}^{(i)}-U_{1j}^{(i)}v_j^{2(i)}e_{4j}^{(i)})/w_j^{(i)}-1/C_{xj}^{equ(i)},$$

$$A_{32j}^{(i)}=(-V_{1j}^{(i)}u_j^{(i)}e_{3j}^{(i)}-U_{1j}^{(i)}v_j^{(i)}e_{4j}^{(i)})/w_l^{(i)}+l_j/C_{xj}^{equ(i)},$$

$$A_{33j}^{(i)}=c(u_j^{(i)}e_{3j}^{(i)}-v_j^{(i)}e_{4j}^{(i)})/C_{xj}^{equ(i)}w_j^{(i)}/N_j^{(i)}, \qquad (16)$$

где $$V_{1j}^{(i)}=v_j^2+N_j^{(i)}/C_{xj}^{equ(i)},\ \ U_{1j}^{(i)}=u_j^2+N_j^{(i)}/C_{xj}^{equ(i)},$$

$$e_{1j}^{(i)}=e^{(-k_{1j}^{(i)}l_j)}+e^{(k_{1j}^{(i)}l_j)},\ \ e_{2j}^{(i)}=e^{(-k_{2j}^{(i)}l_j)}+e^{(k_{2j}^{(i)}l_j)},$$

$$e_{3j}^{(i)}=e^{(-k_{1j}^{(i)}l_j)}-e^{(k_{1j}^{(i)}l_j)},\ \ e_{4j}^{(i)}=e^{(-k_{2j}^{(i)}l_j)}-e^{(k_{2j}^{(i)}l_j)},\ \ w_j^{(i)}=2(v_{1j}^{2(i)}-u_{1j}^{2(i)})N_j^{(i)}. \qquad (17)$$

При линейном перемещении дополнительной связи в узле $(j+1)$ при ($z_j = l_j$) на величину $\delta = 1$ перпендикулярно оси j-го участка стержня рамы будут справедливы следующие граничные условия (в случае свободно сдвигающихся торцов этого участка стержня рамы).

$$v_{jo}^{(i)} = 0\,,\ \ v'^{(i)}_{jo} = 0\ ,\ v''^{(i)}_{jo} = M_{jo}^{(i)} / C_{xj}^{equ(i)}\,,$$

$$v'''^{(i)}_{jo} = (\tau_{jo}^{(i)} c - Q_{jo}^{(i)}) / C_{xj}^{equ(i)},\quad T_{jo}^{(i)} = 0\,,$$

$$v_{j,lj}^{(i)} = \delta\,,\ \ v'^{(i)}_{j,lj} = 0\,,$$

$$v''^{(i)}_{j,lj} = (M_{jo}^{(i)} - Q_{jo}^{(i)} l_j - N_j^{(i)} \delta) / C_{xj}^{equ(i)},\ \ T_{j,lj}^{(i)} = 0\,. \tag{18}$$

Определение реакций в дополнительных связях осуществляется аналогично вышеизложенному для случая поворота дополнительной связи с координатой $z_j = l_j$ на угол $\varphi = 1$.

Если j-й участок составной стержня рамы при $z_j = l_j$ шарнирно оперт, то при повороте дополнительной моментной связи в j-м узле на угол $\varphi = 1$ граничные условия (в случае свободно сдвигающихся торцов стержня) будут иметь вид

$$v_{jo}^{(i)} = 0\,,\ \ v'^{(i)}_{jo} = \varphi\ ,\ \ v''^{(i)}_{jo} = M_{jo}^{(i)} / C_{xj}^{equ(i)}\,,$$

$$v'''^{(i)}_{jo} = (\tau_{jo}^{(i)} c - Q_{jo}^{(i)} - N_j^{(i)} \varphi) / C_{xj}^{equ(i)},\quad T_{jo}^{(i)} = 0\,, \tag{19}$$

$$v_{j,l_j}^{(i)} = 0\,,\quad v''^{(i)}_{j,lj} = 0\,,\quad T_{j,lj}^{(i)} = 0\,.$$

При линейном перемещении дополнительной связи в $(j+1)$ узле ($z_j = l_j$) на $\delta = 1$ перпендикулярно оси j-го участка стержня шарнирно опертого при $z_j = l_j$ граничные условия (в случае свободно сдвигающихся торцов этого стержня) составляются аналогично.

С учетом (19) решается система уравнений (9) аналогично тому, как это было показано для j-го участка составного стержня с жестко защемленными концами.

Перемещения узлов стержня рамы $Z_{1j}^{(i)}$ и $Z_{2j}^{(i)}$ определяются из совместного решения уравнений

$$\sum_{r=1}^{m} (R_{1j1r}^{(i)} Z_{1r}^{(i)} + R_{1j2r}^{(i)} Z_{2r}^{(i)}) + R_{1jp}^{(i)} = 0\,, \tag{20}$$

$$\sum_{r=1}^{m} (R_{2j1r}^{(i)} Z_{1r}^{(i)} + R_{2j2r}^{(i)} Z_{2r}^{(i)}) + R_{2jp}^{(i)} = 0\,, \tag{21}$$

где $R_{1j1r}^{(i)}$ и $R_{1j2r}^{(i)}$ - реакции в связях $1j$ основной системы метода деформаций от единичного перемещения связей $1r$ и $2r$, определенные с учетом влияние продольных сил на i-м шаге нагружения; $R_{2j1r}^{(i)}$ и $R_{2j2r}^{(i)}$ - тоже, но в связях $2j$; $R_{1jp}^{(i)}$ и $R_{2jp}^{(i)}$ - реакции в связях $1j$ и $2j$ от внешней нагрузки на i-м шаге нагружения; m - число узлов с введенными дополнительными связями.

Найденные усилия на опорах j-го стержня при $\varphi = 1$ и $\delta = 1$ далее используются как реакции в связях $R_{1j1r}^{(i)}$, $R_{1j2r}^{(i)}$, $R_{2j1r}^{(i)}$ и $R_{2j2r}^{(i)}$ в уравнениях (20) и (21).

Деформационный расчет рамы осуществляется с использованием эквивалентного модуля деформаций $E_{j\upsilon}^{equ(i)}$, величина которого рассчитывается на каждом следующем шаге расчета по результатам, полученным на предыдущем шаге расчета [3]. Значения параметров, характеризующих напряженно- деформированное состояние рамной системы, найденные на i - м шаге нагружения, могут быть в дальнейшем использованы для проверки устойчивости сжато-изогнутых рам методом проф. Р.С. Санжаровского [5], а также для решения задач, аналогичных [6].

Л и т е р а т у р а

1. *Биргер И.А.* Общие алгоритмы решения задач теории упругости, пластичности и ползучести // Успехи механики деформируемых сред. – М.: Наука , 1975. – С.61 – 73.

2. *Ржаницын А.Р.* Составные стержни и пластинки. –М.: Стройиздат, 1986. – 314 с.

3. *Рочев А.А.* Нелинейная теория расчета сквозных упругопластических статически неопределимых рамных систем // Доклады 58-й конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. В 3 ч. Ч. 1. – СПб.: СПбГАСУ, 2001. С.93 – 94.

4. *Рочев А.А.* Алгоритм нелинейного расчета круговой составной арки // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. « Естественные и технические науки». – 2010. – №2 (107). – С.25-29.

5. *Санжаровский Р.С.* Устойчивость элементов строительных конструкций при ползучести. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. – 280 с.

6. *Yuu-Tai Thai*, *Seung-Eock Kim.* Nonlinear inelastic analysis of space frames // Journal of Constructional Steel Research. – Vol. 67, Iss. 4, April 2011. – P.585-592.

R e f e r e n c e s

1. *Birger, L.A.* (1975). Common algorithms for solving problems in the theory of elasticity, plasticity and creep, *Uspehi mechaniki deformiraemyh sred,* M.: Nauka, 1975, p. 61-73.

2. *Rzhanitzin, A.R.* (1986). *Composite rods and plates*, M.: Stroyizdat, 314 p.

3. *Rochev, A.A.* (2001). Nonlinear theory of analysis of through elastic-plastic statically indeterminate frame systems, *Proc. of the 58th Conference of professors, teachers, researchers, engineers and graduate students*, Part 1, St. Petersburg: Civil Engineering, 2001, p.93 – 94.

4. *Rochev, A.A* (2010). Algorithm for non-linear analysis of circular composite arch, *Proc. of Petrozavodsk State University. Ser. "Natural and engineering sciences",* № 2 (107), p. 25-29.

5. *Sanzharovskiy, R.S.* (1984). *Stability of structural elements under creep*, L.: Izd-vo LGU, 280 p.

6. *Yuu-Tai Thai*, *Seung-Eock Kim* (2011). Nonlinear inelastic analysis of space frames, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, Iss. 4, p. 585-592.

ON THE DEFORMATION ANALYSIS OF FRAMES OF INELASTIC CONSTITUENTS

Rochev A.A.

Petrozavoskiy Gosudarstvenniy Universitet, Petrozavodsk

In this paper, the problem of the deformation calculation of compressed-bent frame of the inelastic elements of the composite having a variable cross section and variable stiffness along the length of shear ties was solved. The solution is based on the theory of elastic composite bars of A.R Rzhanitzin. Statically indetermination of frames is disclosed by the deformation method. Reactions in the input connections are determined by the method of initial parameters. Stiffness of the composite elements is determined using the expression for the determination of equivalence of deformation coefficient, previously obtained by the author, which takes into account the compressibility of the branches, shear deformations of the material of branches forming the bar, the development of inelastic deformation in them.

KEY WORDS: compressed-curved frame, the strain calculation, the equivalent deformation module.