

ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УСИЛИВАЕМЫХ НАГРУЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

М. Н. СЕРАЗУТДИНОВ, *д-р физ.-мат. наук, профессор*

М.Н. УБАЙДУЛЛОЕВ, *канд. техн. наук, доцент*

Х.А. АБРАГИМ, *аспирант*

Казанский государственный технологический университет

420015, Казань, ул. К. Маркса, 68, office@kstu.ru

В статье описывается вариационный метод расчета напряженно-деформированного состояния конструкций усиливаемых без вывода из эксплуатации. Излагается методика определения эффективности усиления нагруженных конструкций с учетом упругопластической работы материала. На основе изложенного метода составлена компьютерная программа, которая позволяет моделировать работу усиливаемой конструкции и определять его напряженно-деформированное состояние на различных этапах с учетом деформаций и напряжений действующих во время усиления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ремонт и усиление конструкций, напряженное состояние, упругопластическая деформация, ремонтные напряжения, вариационный метод.

Усиление сооружений в ряде случаев проводится без их полной разгрузки. Как известно, несущая способность усиливаемых в таких условиях конструкций существенно зависит от уровня напряжений, при которых проводится ремонт и усиление [1, 2]. Для таких конструкций характерным является, повышенная деформативность, снижение уровня нагрузок, при которых возникают пластические деформации [2]. Следовательно, возникает необходимость использовать специальные разработанные методики расчета несущей способности конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии.

В статье описывается вариационный метод расчета напряженно-деформированного состояния стержневых систем, усиливаемых в напряженном состоянии. Излагается методика определения эффективности усиления нагруженных конструкций с учетом упругопластической работы материала.

Для иллюстрации особенностей расчета напряженно-деформированного состояния, возникающих при усилении стержневой системы, рассмотрим статически неопределимую раму, представленную на рис. 1. Ограничимся анализом распределения нормальных напряжений.

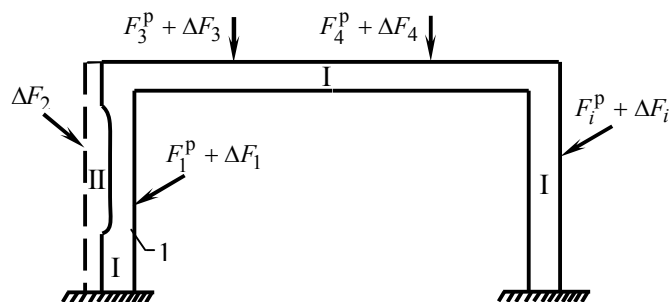


Рис. 1. Схема усиливаемой рамной конструкции: I - зона основного материала конструкции; II - усиливаемая зона

Полагаем, что стойка I системы имеет поверхностное повреждение по длине. Из-за нагрузок F_i^P , действующие в период усиления, в стержневой системе возникают некоторые начальные деформации и напряжения. В этом состоянии конструкцию усиливают за счет увеличения размеров сечения поврежде-

денного элемента 1 (рис. 1). После ремонта занимаемая элементом область увеличивается на величину II. Считаем, что при проведении ремонта дополнительных напряжений не возникают. В области I элементов конструкций действуют ремонтные напряжения σ^P (рис. 2, б), а в области II – напряжений нет.

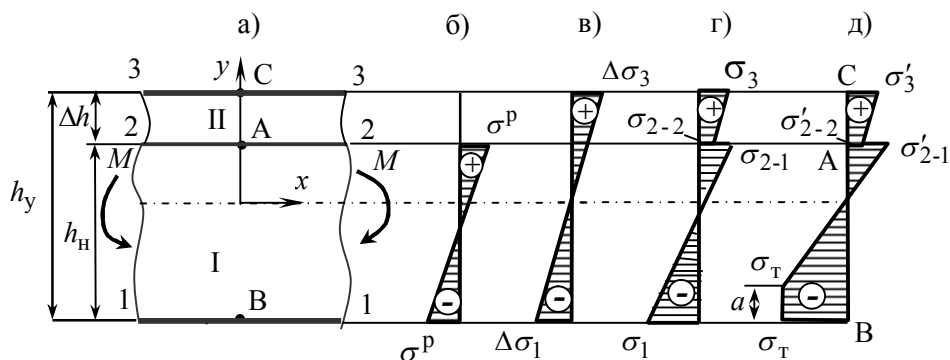


Рис. 2. Эпюры напряжений в сечении усиленного элемента

После усиления к конструкции прикладываются дополнительные эксплуатационные нагрузки ΔF_i . При этом, во всех элементах системы (в областях I и II), возникают дополнительные напряжения $\Delta\sigma$ (рис. 2, в), которые в пределах области I, в соответствии с принципом суперпозиции (при упругих деформациях), складываются с ремонтными напряжениями σ^P . Следовательно, в области I будут действовать напряжения $\sigma_x = \sigma^P + \Delta\sigma$.

Распределение напряжения σ_x по высоте сечения определяется величинами σ_1 , σ_{2-1} , σ_{2-2} , σ_3 (рис. 2, г), где σ_1 – напряжение на грани поврежденного сечения в основном материале (точка В); σ_{2-1} – напряжение на границе контакта материалов – основного и использованного для ремонта (ремонтный материал); σ_{2-2} – напряжение на поверхности ремонтного материала в месте контакта с основным материалом (точка А); σ_3 – приращение фибровых напряжений в зоне ремонтного материала (точка С).

Если в некоторой области I σ_x достигают или превышают предел текучести σ_T , то возникнет зона пластических деформаций. В этом случае величину σ_x нельзя получить арифметическим суммированием σ^P и $\Delta\sigma$. Произойдет перераспределение напряжений. Неизвестными величинами становятся значения напряжений σ'_{2-1} , σ'_{2-2} , σ'_3 и длина зоны пластических деформаций a (рис. 2, д), которые необходимо определять из решения задачи упругопластического деформирования. В этом случае следует учитывать, что принцип суперпозиции не применим, а области действия напряжений, возникающих от ремонтных F_i^P и эксплуатационных ΔF_i нагрузок различны.

Для решения задачи упругопластического деформирования стержневой системы использовался вариационный метод, который является более универсальным, по сравнению с методикой, изложенной в [3]. Этот метод позволяет учитывать такие особенности, как изменение размеров поперечного сечения стержня и последующее дополнительное нагружение конструкции, наложение полей напряжений, сопровождающееся возникновением пластических дефор-

маций, наложение напряжений, обусловленных различными факторами, в том числе и технологическими.

Принимались основные допущения и соотношения теории стержней с учетом сдвигов [4]. Задача определения напряженно-деформированного состояния усиливаемой конструкции решалась применительно к стержневым системам, при деформировании которых преобладающими являются нормальные напряжения. Полагаем, что касательные напряжения τ_{xy} , τ_{xz} и угловые деформации γ_{xy} , γ_{xz} связаны законом Гука, а зависимость между нормальными напряжениями σ_x и линейными деформациями ε_x описывается диаграммой Прандтля. Использовалось вариационное уравнение Лагранжа

$$\delta U_{\text{упр}} + \delta U_{\text{пл}} - \delta W = 0, \quad (1)$$

где $\delta U_{\text{упр}}$ – вариация потенциальной энергии деформации стержневой системы в зоне упругих деформаций; $\delta U_{\text{пл}}$ – вариация потенциальной энергии в зоне пластических деформаций; δW – вариация работы внешних сил

При решении задачи, вводится глобальная ортогональная система координат $0\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$, вектор перемещения точек продольной оси стержня $\bar{u} = \{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3\}^T$ и вектор углов поворота поперечных сечений $\bar{\varphi} = \{\tilde{\varphi}_1, \tilde{\varphi}_2, \tilde{\varphi}_3\}^T$. Компоненты этих векторов определены в системе координат $0\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$.

В условие (1) входят перемещения, углы поворота поперечных сечений и деформации стержня. Для записи этого условия, в каждой точке, где это необходимо, перемещения u_1, u_2, u_3 , углы поворота $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и деформации вычисляются в локальной ортогональной системе координат $0xyz$, с осью $0x$, направленной по касательной к продольной оси стержня [5]. При таком способе вычисления

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{упр}} = & \int_{l_{\text{упр}}} \left[\iint_{A_{\text{упр}}^y} (E\varepsilon_x \delta\varepsilon_x + G\gamma_{xy} \delta\gamma_{xy} + G\gamma_{xz} \delta\gamma_{xz}) dA + \right. \\ & \left. \iint_{A_{\text{упр}}^n} (\sigma^p \delta\varepsilon_x + \tau_{xy}^p \delta\gamma_{xy} + \tau_{xz}^p \delta\gamma_{xz}) dA \right] dl, \\ \delta U_{\text{пл}} = & \int_{l_{\text{пл}}} \left[\iint_{A_{\text{пл}}^y} (\sigma_t \delta\varepsilon_x + G\gamma_{xy} \delta\gamma_{xy} + G\gamma_{xz} \delta\gamma_{xz}) dA + \iint_{A_{\text{пл}}^n} (\tau_{xy}^p \delta\gamma_{xy} + \tau_{xz}^p \delta\gamma_{xz}) dA + \right. \\ & \left. \iint_{A_{\text{упр}}^y} (E\varepsilon_x \delta\varepsilon_x + G\gamma_{xy} \delta\gamma_{xy} + G\gamma_{xz} \delta\gamma_{xz}) dA + \iint_{A_{\text{упр}}^n} (\sigma^p \delta\varepsilon_x + \tau_{xy}^p \delta\gamma_{xy} + \tau_{xz}^p \delta\gamma_{xz}) dA \right] dl, \quad (2) \\ \delta W = & \int_{l_q} (q_1^y \delta u_1 + q_2^y \delta u_2 + q_3^y \delta u_3) dl + \sum_i (F_{1i}^y \delta u_1(x_i) + F_{2i}^y \delta u_2(x_i) + F_{3i}^y \delta u_3(x_i)) + \\ & + \sum_k (M_{1k}^y \varphi_{1k}(x_k) + M_{2k}^y \varphi_{2k}(x_k) + M_{3k}^y \varphi_{3k}(x_k)) \end{aligned}$$

Здесь σ^p , τ_{xy}^p , τ_{xz}^p – нормальные и касательные напряжения, действующие в период проведения ремонта (усиления); $\varepsilon_x, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}$ – линейные и угловые деформации; $l_{\text{упр}}, l_{\text{пл}}$ – длины участков стержневой системы, в которых возникают, соответственно, только упругие и упругопластические деформации; $A_{\text{упр}}^n, A_{\text{пл}}^n, A_{\text{упр}}^y, A_{\text{пл}}^y$ – площади поперечных сечений стержней после получения поврежде-

ния и после усиления, в которых возникают, соответственно, упругие и пластические деформации; σ_T - предел текучести материала; q_1^y, q_2^y, q_3^y - интенсивность распределенных сил; $F_{1i}^y, F_{2i}^y, F_{3i}^y$ - сосредоточенные силы; $M_{1k}^y, M_{2k}^y, M_{3k}^y$ - сосредоточенные моменты.

Проекции на оси координат интенсивности внешних распределенных нагрузок q_1^y, q_2^y, q_3^y , проекции сосредоточенных сил $F_{1i}^y, F_{2i}^y, F_{3i}^y$, внешние сосредоточенные моменты относительно осей координат $M_{1k}^y, M_{2k}^y, M_{3k}^y$ состоят из нагрузок, действовавших во время ремонта $q_1^p, q_2^p, q_3^p, F_{1i}^p, F_{2i}^p, F_{3i}^p, M_{1k}^p, M_{2k}^p, M_{3k}^p$ и дополнительных нагрузок $\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3, \Delta F_{1i}, \Delta F_{2i}, \Delta F_{3i}, \Delta M_{1k}, \Delta M_{2k}, \Delta M_{3k}$, связанных с эксплуатацией усиленной конструкции:

$$\begin{aligned} q_1^y &= q_1^p + \Delta q_1, & q_2^y &= q_2^p + \Delta q_2, & q_3^y &= q_3^p + \Delta q_3; \\ F_{1i}^y &= F_{1i}^p + \Delta F_{1i}, & F_{2i}^y &= F_{2i}^p + \Delta F_{2i}, & F_{3i}^y &= F_{3i}^p + \Delta F_{3i}; \\ M_{1k}^y &= M_{1k}^p + \Delta M_{1k}, & M_{2k}^y &= M_{2k}^p + \Delta M_{2k}, & M_{3k}^y &= M_{3k}^p + \Delta M_{3k}. \end{aligned}$$

Полагаем, что в поперечных сечениях стержней возникают деформации:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{du_1}{dx} - y \frac{d\varphi_3}{dx} + z \frac{d\varphi_2}{dx}, & \gamma_{xy} &= f_1(y, z) \left[\frac{du_2}{dx} - \varphi_3 \right] - f_2(y, z) \frac{d\varphi_1}{dx}, \\ \gamma_{xz} &= f_1^*(y, z) \left[\frac{du_2}{dx} + \varphi_2 \right] + f_2^*(y, z) \frac{d\varphi_1}{dx}, \end{aligned}$$

где $f_1(y, z), f_2(y, z), f_1^*(y, z), f_2^*(y, z)$ - некоторые функции, конкретный вид которых зависит от вида деформации, формы поперечного сечения стержня, положения начала системы координат $Oxyz$. Отметим что функции $f_1(y, z), f_1^*(y, z)$ должны описывать распределение деформаций и напряжений в сечении стержня при изгибе, а $f_2(y, z), f_2^*(y, z)$ - при кручении.

Так, например, для стержня с поперечным сечением в виде круга радиуса R , для центральных осей $Oxyz$, при косом изгибе с кручением

$$\begin{aligned} f_1(y, z) &= \frac{4}{3} \left[1 - (y/R)^2 \right]; & f_1^*(y, z) &= \frac{4}{3} \left[1 - (z/R)^2 \right]; \\ f_2(y, z) &= z; & f_2^*(y, z) &= y. \end{aligned}$$

Для стержня с поперечным сечением в виде прямоугольника со сторонами h и b $\left(-\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}, -\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2} \right)$ при косом изгибе $f_1(y, z) = 6[0,25 - (y/b)^2]$;

$$f_1^*(y, z) = 6[0,25 - (z/h)^2]; \quad f_2(y, z) = f_2^*(y, z) = 0.$$

При кручении стержня с сечением, например, в виде прямоугольника выражения для функций $f_2(y, z), f_2^*(y, z)$ будут зависеть от отношения сторон h/b . Если h и b сравнимы по величине, то для записи $f_2(y, z), f_2^*(y, z)$ можно использовать результаты решения задачи кручения стержня, полученное по теории упругости. Если $h/b \ll 1$ или $h/b \gg 1$, то для записи указанных функций можно применить результаты теории тонкостенных стержней.

Отличительная особенность выражений (2) состоит в том, что в них входят, возникающие в период усиления (ремонта), нормальные и касательные напря-

жения $\sigma_x^p, \tau_{xy}^p, \tau_{xz}^p$, действующие в областях поперечных сечений стержней с площадью $A_{\text{упр}}^n$ и $A_{\text{пл}}^n$ (область I), являющихся только частью области увеличенного при усилении.

Стержневая система разбивается на N участков, на каждом из которых компоненты векторов \bar{u} и $\bar{\varphi}$ представляются в следующем виде:

$$\tilde{u}_k = \tilde{u}_k^i = \sum_{m=1}^M C_{km}^i f_m(t), \quad \tilde{\varphi}_k = \tilde{\varphi}_k^i = \sum_{m=1}^M D_{km}^i f_m(t). \quad (3)$$

Здесь $f_1(t) = 1 - t$, $f_2(t) = t$, $f_m(t) = (1 - t)t^{m-2}$, $m = \overline{3, M}$; C_{km}^i, D_{km}^i - неизвестные постоянные; $t = x/l_i$ ($0 \leq t \leq 1$); x - длина продольной оси стержня, отсчитываемая, от начала участка; l_i - длина участка стержня; $k = \overline{1, 2, 3}$; $i = \overline{1, N}$.

Перемещения и углы поворота в локальной и глобальной системах координат связаны соотношениями

$$u_j = \sum_{k=1}^3 n_{jk} \tilde{u}_k, \quad \varphi_j = \sum_{k=1}^3 n_{jk} \tilde{\varphi}_k, \quad j = \overline{1, 2, 3}, \quad (4)$$

где n_{jk} - направляющие косинусы локальной системы координат.

Удовлетворяя кинематическим граничным условиям, условиям стыковки перемещений \bar{u} и углов поворота $\bar{\varphi}$ на границах участков стержней, после подстановки выражений (2) в условие (1) и интегрирования, получим систему алгебраических уравнений

$$[K]\{C\} = \{F\}. \quad (5)$$

Здесь $[K]$ - матрица жесткости стержневой конструкции; $\{C\}$ - вектор неизвестных постоянных; $\{F\}$ - вектор зависящее от внешних нагрузок. Решая систему уравнений (5), находим неизвестные коэффициенты C_{km}^i, D_{km}^i .

Для вычисления интегралов, которые содержатся в условии (1), используется численное интегрирование с использованием формулы Гаусса. Интегрирование проводится по длине стержней и по площади их поперечных сечений.

При интегрировании по площади поперечного сечения стержня A , необходимо вычислить интегралы

$$J_A = \iint_A f(y, z) dA = J_A^{\text{упр}} + J_A^{\text{пл}}. \quad (6)$$

Здесь $f(y, z)$ - заданная функция;

$$J_A^{\text{упр}} = \iint_{A_{\text{упр}}^y} f(y, z) dA, \quad J_A^{\text{пл}} = \iint_{A_{\text{пл}}^y} f(y, z) dA. \quad (7)$$

Например: при $f(y, z) = 1$, $J_A = A = \iint_A dA$; при $f(y, z) = z$, $J_A = S_y = \iint_A z dA$;

при $f(y, z) = z^2$, $J_A = J_y = \iint_A z^2 dA$; при $f(y, z) = zy$, $J_A = J_{zy} = \iint_A zy dA$.

Используя формулу численного интегрирования, интеграл (6) можно представить в следующем виде:

$$J_A = \sum_{j=1}^J f(y_j, z_j) \alpha_j, \quad (8)$$

где (y_j, z_j) , α_j – координаты точек интегрирования и весовые множители [6], j – число точек интегрирования.

При формировании системы алгебраических уравнений (5) нужно знать значения $J_A^{\text{упр}}$, $J_A^{\text{пл}}$. Области упругих $A_{\text{упр}}^y$ и пластических деформаций $A_{\text{пл}}^y$ заранее неизвестны. Поэтому для вычисления $J_A^{\text{упр}}$, $J_A^{\text{пл}}$ используется следующий метод. По аналогии с (7), полагается

$$J_A^{\text{упр}} = \sum_{j=1}^J f(y_j, z_j) \alpha_j B_j^{\text{упр}}, \quad J_A^{\text{пл}} = \sum_{j=1}^J f(y_j, z_j) \alpha_j B_j^{\text{пл}}. \quad (9)$$

Отличие в формулах численного интегрирования (8) и (9) состоит в том, что в (9) введены коэффициенты $B_j^{\text{упр}}$, $B_j^{\text{пл}}$, значения которых зависят от того, возникают ли в точке поперечного сечения (y_j, z_j) только упругие или упруго-пластические деформации.

Расчет усиливаемой конструкции состоит из следующих этапов:

1. Определение напряженно-деформированного упругого состояния исходной (поврежденной) стержневой системы при действии ремонтных нагрузок.
2. Определение напряженно-деформированного состояния конструкции после усиления, с учетом ремонтных напряжений и действия дополнительных эксплуатационных нагрузок.

Так как положение областей пластических деформаций в стержнях заранее неизвестно, для нахождения этих областей используется итерационный метод. На первой итерации деформации считаются упругими ($A_{\text{пл}}^y = 0$, $B_j^{\text{упр}} = 1$, $B_j^{\text{пл}} = 0$), а на последующих итерациях, в каждой точке интегрирования (y_j, z_j) проверяется выполнение условия

$$\sigma^p + \Delta\sigma < \sigma_T. \quad (10)$$

Если это условие выполняется, то $B_j^{\text{упр}} = 1$, $B_j^{\text{пл}} = 0$, если не выполняется, то $B_j^{\text{упр}} = 0$, $B_j^{\text{пл}} = 1$. Итерационный процесс заканчивается при выполнении условия $\left(\left| M^{(n)} - M^{(n+1)} \right| / M^{(n+1)} \right) \cdot 100\% \leq \varepsilon$, где ε – заданная величина погрешности, $M^{(n)}$ и $M^{(n+1)}$ – наибольшие изгибающие моменты в сечениях элементов стержневой системы после усиления на шаге (n) и $(n+1)$.

На основе изложенной методики составлена компьютерная программа, которая позволяет моделировать работу усиливаемой конструкции и определять его напряженно-деформированное состояние на различных этапах с учетом деформаций и напряжений действующих во время усиления. Достоверность и высокая точность расчетов по этой программе установлена на основе сравнения полученных результатов с данными решения тестовых примеров и задач решения, которых получены другими методами.

Приведем пример расчета рамной конструкции, элементы которой имеют прямоугольную форму поперечного сечения (рис. 3, а). Полагаем, что левая стойка рамы имеет сплошное по длине повреждение и восстанавливается до первоначальных размеров при различных уровнях относительных ремонтных напряжений $\tilde{\nu} = \sigma^p / R$, где R – расчетное сопротивление материала. До получения повреждения стойки рамы имели одинаковые размеры поперечных сече-

ний. Геометрические характеристики сечений элементов рамы следующие: для поврежденной стойки $b_{\text{п}} = 0,5 \text{ м}$, $h_{\text{п}} = 0,6 \text{ м}$; для неповрежденной стойки $b_{\text{н}} = 0,5 \text{ м}$, $h_{\text{н}} = 0,8 \text{ м}$; для ригеля $b = 0,5 \text{ м}$, $h = 1,0 \text{ м}$. Характеристики материала конструкции $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{T}} = 240 \text{ МПа}$. В расчетах значение интенсивности распределенных нагрузок принималось равной $q = 0,02F / \text{м}$.

Как известно [1], степень восстановления первоначальной несущей способности конструкции оценивается по показателю θ равному отношению несущей способности конструкции после усиления N^y к её первоначальной несущей способности N^H . В рассматриваемом примере показатель θ вычисляется по формуле $\theta = F^y / F^H$, где F^H , F^y – нагрузки воспринимаемые конструкцией до получения повреждения и после усиления. Необходимо отметить, что здесь при вычислении показателя θ значение нагрузки воспринимаемой неповрежденной рамой F^H определяется при упругих деформациях.

Графики зависимости $\theta = f(\tilde{v})$ представлены на рис. 3, для случаев, когда размеры зоны пластических деформаций лимитирующего сечения рамы составляют соответственно $A_{\text{пл}} = 0,0125 \text{ м}^2$ (рис. 3б, линия 2) и $A_{\text{пл}} = 0,1 \text{ м}^2$ (линия 1). Также представлены результаты расчетов (линия 3), для случая, когда деформации являются упругими [7]. Из анализа этих графиков видно, что учет упругопластических свойств материала приводит к существенному возрастанию несущей способности усиливаемой конструкции по сравнению с результатами расчетов по методике [7]. Так в случаях, когда $\tilde{v} = 0,6$, $A_{\text{пл}} = 0,0125 \text{ м}^2$ и $A_{\text{пл}} = 0,1 \text{ м}^2$ показатель θ увеличился соответственно на 58 % и 97 %.

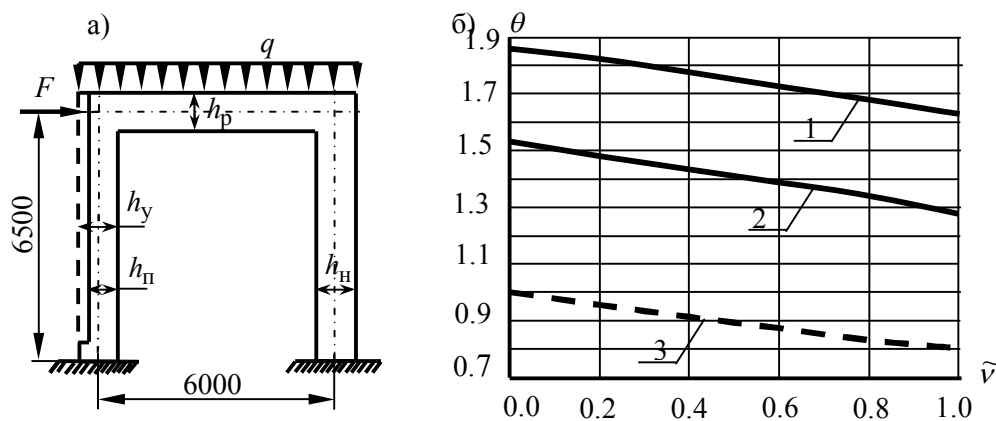


Рис. 3. а) Расчетная схема рамы; б) Графики зависимости $\theta = f(\tilde{v})$

1 – при $A_{\text{пл}} = 0,1 \text{ м}^2$; 2 – при $A_{\text{пл}} = 0,0125 \text{ м}^2$;

3 – по методике, описанной в [7].

Л и т е р а т у р а

1. Будин, А.Я. Усиление портовых сооружений / А.Я. Будин, М.В. Чекренева. – М.: Транспорт, 1983. – 178 с.
2. Ребров, И.С. Усиление стержневых металлических конструкций / И.С. Ребров. – Л.: Стройиздат, 1988. – 288 с.
3. Убайдуллоев, М.Н. Влияние пластических деформаций на несущую способность усиливаемых статически неопределимых конструкций / М.Н. Убайдуллоев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений: обзорно-аналит. и научно-технич. журн. – М.: - РУДН, 2008. - № 4. - С. 28-33.

4. Тимошенко, С. П. Механика материалов / С. П. Тимошенко, Дж. Гере. – Мир, 1976. – 672 с.
5. Серазутдинов, М.Н. Метод расчета криволинейных стержней. / М. Н. Серазутдинов, Ф. С. Хайруллин // Строительство и архитектура. – 1991. - № 5. – С. 104-108.
6. Справочник по специальным функциям / Под редакцией М. Абрамовица и И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
7. Убайдуллоев, М.Н. Оценка напряженно-деформированного состояния конструкций после их усиления /М. Н. Убайдуллоев // Труды НГАСУ. -2003. - Т.6, № 6 (27). – С. 148-153.

INCREASING OF THE LOAD-CARRING CAPACITY IN THE STRENGTHENED LOADED STRUCTURES

M.N. Serazutdinov, M.N. Ubaydullov, H.A. Abraham

In article the variation method is presented to calculate the stress-strain state of structures strengthening without withdrawal from the exploitation. The procedure is presented to determine the strengthening effectiveness on loaded beam structures with taking into account elastic-plastic works of material. On the basis of the stated method, the computer program is made and it allows to simulate the strengthened construction model work and to estimate its stress-strain condition at various stages with taking into account the deformations and the stresses which have an effect during the strengthening.

KEY WORDS: repair and strengthening of constructions, stress state, elastic-plastic deformations, repair stress, variation method.