

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ КОНСТРУКЦИЙ УСИЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТЕЙ

М.Н. УБАЙДУЛЛОЕВ, канд. техн. наук, доцент
Казанский государственный технологический университет
420015, Казань, К. Маркса, 68, КГТУ; office@kstu.ru

Излагается методика оценки эффективности усиления статически неопределимых конструкций усиливаемых методом направленного перераспределения жесткостей. Получены зависимости по определению несущей способности усиливаемых конструкций, находящихся в сложном напряженном состоянии. Приводятся результаты, позволяющие оценить степень повышения несущей способности усиливаемой конструкции при упругопластических деформациях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: усиление конструкций, метод направленного перераспределения жесткостей, сложное напряженное состояние, несущая способность конструкций, упруго-пластические деформации, изгибающий момент, продольная сила

Как известно эффективность функционирования портов зависит от состояния портовых сооружений. Характерная особенность большинства портовых сооружений состоит в том, что они в процессе эксплуатации постоянно подвергаются разнообразным и интенсивным внешним воздействиям, что приводит к постепенному снижению их несущей способности. Особенностью ряда портовых гидротехнических сооружений является то, что некоторые из их несущих элементов практически недоступны для ремонта и усиления в связи с невозможностью их обнажения в период эксплуатации. Применительно к таким случаям задача отыскивания приемлемых способов усиления конструкций является особенно актуальной. В работе [1] был предложен такой способ, получивший наименование метода направленного перераспределения жесткостей.

Его сущность заключается в том, чтобы обеспечить такое перераспределение соотношения жесткостей элементов статически неопределимой системы, при котором доля нагрузки, приходящаяся на ослабленный или недоступный

для усиления элемент снизится. Поскольку в статически неопределимой системе распределение усилий между элементами зависит от соотношения жесткостей, такое мероприятие автоматически приводит к частичной разгрузке элементов, жесткость которых осталась неизменной.

Методика расчета статически неопределимых конструкций, усиливаемых методом направленного перераспределения жесткостей, рассмотрено в [2]. Однако в этой работе влияние пластических деформаций на эффект усиления не учитываются.

Как известно [2], эффективность усиления статически неопределимых конструкций оценивают по показателю

$$\theta = \frac{M_y}{M_H + \delta M + \delta M_1} \quad (1)$$

где M_y – изгибающий момент, который может воспринять элемент после усиления; M_H – момент, действующий до возникновения повреждения или ослабления; δM – приращение изгибающего момента от нагрузки, действовавшей в период ремонта (δM – возникает из-за изменения соотношения жесткостей элементов системы при повреждении); δM_1 – приращение прибавки изгибающего момента от добавочной нагрузки на конструкцию после ее усиления.

Величина M_y при упругой работе конструкции

$$M_y = M_p + \Delta M, \quad (2)$$

где M_p – изгибающий момент, воспринимаемый поврежденным элементом в период ремонта; ΔM – добавочный изгибающий момент, который может воспринимать поврежденный элемент конструкции после усиления.

В данной работе излагается методика оценки эффективности усиления статически неопределимых конструкций усиливаемых методом направленного перераспределения жесткостей с учетом возникновения пластических деформаций. Рассматривается расчетная методика определения несущей способности усиливаемых конструкций, находящихся в сложном напряженном состоянии.

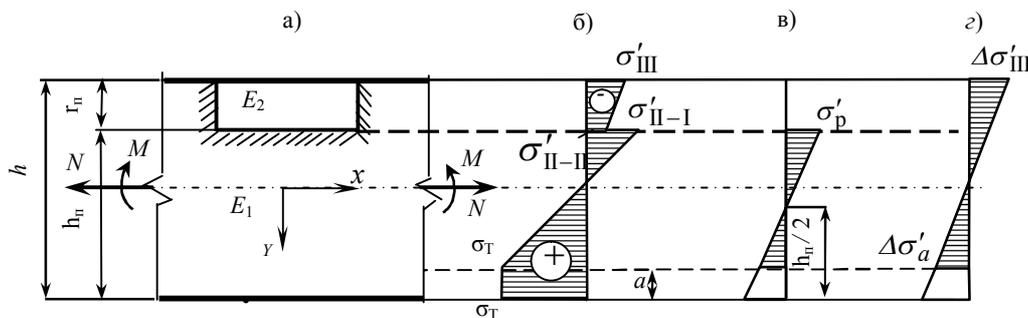


Рис. 1. Схема для определения напряжений в сечении усиленного элемента:

- а) схема участка восстановленного стержня; б) эпюра результирующих напряжений после усиления; в) эпюра напряжений σ_p , действующих в период ремонта; г) эпюра добавочных напряжений $\Delta\sigma$.

Принимаем допущение, что поведение материала характеризуется диаграммой идеально упругопластического материала (диаграммой Прандтля). Рассмотрим случай восстановления поврежденной балки прямоугольного сечения, находящейся под воздействием изгибающего момента и продольной силы (рис. 1). Если отремонтировать элемент, не выводя его из напряженного состояния, то заполнивший повреждение ремонтный материал при неизменной внешней нагрузке не воспринимает напряжений. Эффект ремонта начнет сказываться

ся только в том случае, если нагрузка на элемент будет увеличена. Рассмотрим случай, когда ремонт произведен материалом, модуль упругости, которого E_2 равен модулю упругости основного материала конструкции E_1 (рис. 1, а). Механизм изменения несущей способности восстанавливаемого нагруженного сечения с зоной развития пластических деформаций величиной a (рис.1) аналогичен случаю чистого изгиба, который изложен в работе [3].

На рис. 1, б приняты следующие обозначения: σ'_{II-I} – приращение напряжений на поверхности основного материала в месте контакта с материалом использованным для ремонта (ремонтный материал); σ'_{II-II} – приращение напряжений на поверхности ремонтного материала в месте контакта с основным материалом; σ'_{III} – приращение фибровых напряжений в зоне ремонтного материала. При этом формулу (2), с учетом упругопластического деформирования сечения, можно представить

$$M_y = M'_p + \Delta M' + \Delta M_{пл}, \quad (3)$$

где $\Delta M_{пл}$ – изгибающий момент, воспринимаемый зоной пластических деформаций. Если наряду с изгибом элемент подвержен осевому сжатию или растяжению величина M'_p принимает вид*:

$$M'_p = M_p \pm N_n e, \quad (4)$$

где N_n – продольная сила, действующая в период ремонта, e – эксцентриситет продольной силы относительно нейтральной оси поврежденного сечения.

Выражение для определения M'_p , согласно эпюре распределения напряжений σ'_p (рис.1, б) действующие во время ремонта, получаем в виде:

$$M'_p = \frac{1}{3} \sigma'_{pa} (h_n / 2 - a)^2 + \frac{1}{3} \sigma'_p (h_n / 2)^2, \quad (5)$$

$$\text{где} \quad \sigma'_p = \sigma_p \pm \sigma_{N_n}, \quad \sigma'_{pa} = \sigma'_p \frac{h_n / 2 - a}{h_n / 2}. \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) σ'_{pa} – величина напряжений, обусловленная воздействием изгибающего момента M'_p и продольной силой N_n в зоне основного материала на высоте a от крайних волокон (рис.1, б); σ_{N_n} – напряжения в поврежденном сечении от воздействия продольной силы N_n ; h_n – высота поврежденного сечения.

После преобразований выражение (5) с учетом (6) и полагая $\tilde{\nu} = \sigma_p / R$ (здесь R – расчетное сопротивление материала), $n = \sigma_t / R$, $\xi = a / h$, $\nabla = h_n / h$, $a_{N_n} = \sigma_{N_n} / R$ представим в виде

$$M'_p = \sigma_t h_y^2 \lambda (\tilde{\nu} \pm a_{N_n}). \quad (7)$$

В формулах (4), (6) и (7) со сдвоенными знаками в расчет следует вводить верхний, если напряжения на контуре повреждения от изгиба и действия продольной силы одного знака, и нижний, если напряжения разных знаков.

Изгибающий момент $\Delta M'$, соответствующий эпюре приращений напряжений $\Delta \sigma$ (рис.1, в), остаётся такими же, как у элемента работающий на чистый изгиб [3]

$$\Delta M' = \sigma_t h_y^2 \bar{\lambda}_1 (1 - \tilde{\nu}_{pa}). \quad (8)$$

Величина $M_{пл}$, воспринимаемого зоной пластических деформаций

$$\Delta M_{пл} = \sigma_t h_y^2 \xi (\bar{\psi} - \xi / 2). \quad (9)$$

В формулах (7), (8) и (9) λ , $\bar{\lambda}_1$, $\tilde{\nu}_{pa}$ и $\bar{\psi}$ – коэффициенты, определяемые в соответствии с [3]. Изгибающий момент, который способен воспринять неповрежденный элемент, с учетом упруго-пластической работы материала, определяется выражением

$$M_n = (\sigma_T - \sigma_N) h_n^2 \beta, \quad (11)$$

где σ_N – нормальные напряжения, вызванные действием продольной силы N в неповрежденном сечении, β – коэффициент, определяемый согласно [2].

Выражая $a_N = \sigma_N / R$, и после преобразований выражение (11) приводим к виду

$$M_n = \sigma_T h^2 \beta (1 - a_N / n). \quad (12)$$

Для элементов статически неопределимых стержневых систем входящие в выражение (2) величины δM и δM_1 можно представить в виде

$$\delta M = \eta \tilde{\nu} R h_n^2 / 6, \quad \delta M_1 = \eta_1 \sigma_T h_y^2 \bar{\lambda}_1 (1 - \tilde{\nu}_{pa}), \quad (13)$$

где h_n и h_y – соответственно высота сечения элемента стержневой системы в поврежденном и усиленном состояниях; η и η_1 – коэффициенты определяемые по соотношениям, приведенным в работе [2]. Подставляя формулы (8), (9), (10), (12) и (15) в формулу (3), и после преобразований получаем

$$\theta = \frac{\lambda(\tilde{\nu} \pm a_{N_n}) + \bar{\lambda}_1(1 - \tilde{\nu}_{pa}) + \xi(\bar{\psi} - 0.5\xi)}{\nabla_n^2 \beta(1 - a_N / n) \pm \eta \tilde{\nu} \nabla_n^2 / 6n \pm \eta_1 \bar{\lambda}_1(1 - \tilde{\nu}_{pa})}. \quad (14)$$

Здесь $\xi = a / h_y$, $\nabla_n = h_n / h_y$ и $\nabla_n = h_n / h_y$.

В случае различных деформативных характеристик основного и ремонтно-го материалов формула (14) принимает вид:

$$\theta = \frac{\lambda(\tilde{\nu} \pm a_{N_n}) + (1 - \tilde{\nu}_{pa})[\bar{\lambda}_1 + \bar{\omega}(k - 1)] + \xi(\bar{\psi} - 0.5\xi)}{\nabla_n^2 \beta(1 - a_N / n) + \eta \tilde{\nu} \nabla_n^2 / 6n + \eta_1(1 - \tilde{\nu}_{pa})[\bar{\lambda}_1 + \bar{\omega}(k - 1)]}, \quad (15)$$

где $k = E_2 / E_1$, $\bar{\omega}$ – коэффициент определяемый согласно [3].

Порядок расчета конструкций усиливаемых методом направленного перераспределения жесткостей должен быть следующим:

- Устанавливается предельная несущая способность поврежденной конструкции.
- Задается требуемая степень повышения несущей способности конструкции, выражаемая показателем θ .
- Увеличением жесткости одного или нескольких элементов конструкции, к которым имеется доступ, обеспечивается более благоприятное перераспределение усилий между элементами конструкций для достижения требуемого значения θ .
- Вычисляется требуемое соотношение жесткости элементов после усиления, при котором несущая способность конструкции возрастает на заданную величину.

Выражение для требуемого момента сопротивления сечений элементов после усиления \bar{W}_y при котором их несущая способность возрастает на заданную величину, полученное из (14), имеет вид:

$$\bar{W}_y = \frac{\theta [W_n \beta (1 - a_N / n) + \eta \tilde{\nu} W_n / 6n]}{\tilde{\nu} \lambda + \bar{\lambda}_1 (1 - \tilde{\nu}_{pa}) (1 - \theta \eta_1) + \xi (\bar{\psi} - 0.5 \xi)}. \quad (16)$$

В формуле (16) W_n и W_n – соответственно моменты сопротивления лимитирующего сечения рамы в неповрежденном и поврежденном состояниях.

В случае, когда $E_2 \neq E_1$ из (15) получаем

$$\bar{W}_y = \frac{\theta [W_n \beta (1 - a_n / n) + \eta \tilde{v} W_n / 6n]}{\lambda (\tilde{v} \pm a_{N_n}) + (1 - \tilde{v}_{pa})(1 - \theta \eta_1) [\bar{\lambda}_1 + \bar{\omega}(k-1)] + \xi(\bar{\nu} - 0.5\xi)}$$

Для любой заданной конструкции расчеты усиления методом направленного перераспределения жесткостей можно выполнять для всех возможных вариантов усиления, а затем выбирать наиболее экономичный. Для того, чтобы проиллюстрировать эффективность усиления статически неопределимых конструкций методом направленного перераспределения жесткостей по предлагаемой методике, рассмотрен пример расчета рамной конструкции, левая стойка которой имеет сплошное по длине повреждение (рис. 1, а).

Рассмотрен случай усиления правой стойки, лимитирующего несущую способность рамы, при относительной высоте поврежденного сечения $\nabla = 0.875$. Элементы рамы имеют прямоугольную форму сечения. Размеры сечений элементов рамы: поврежденной стойки $b_n = 10$ см, $h_n = 14$ см; неповрежденной стойки до усиления $b_n = 10$ см, $h_n = 16$ см; ригеля $b_p = 10$ см, $h_p = 40$ см. При расчетах полагалось $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_T = 240$ МПа, $\xi = 0.05$, $n = 1.5$.

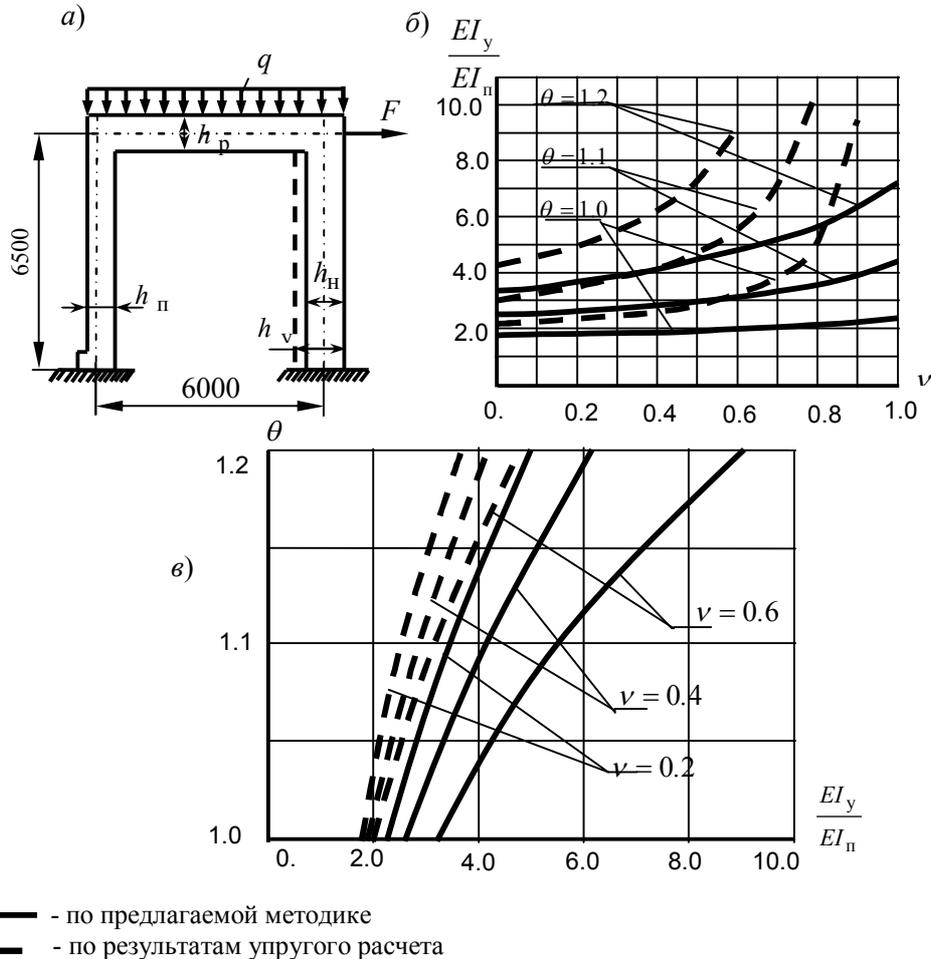


Рис. 2

а) расчетная схема рамы; б) графики зависимости $EI_y / EI_n = f(v)$;

в) графики зависимости $\theta = f(EI_y / EI_n)$

Полагается, что поврежденная стойка недоступна для усиления, поэтому усилению подвергается неповрежденная стойка. По результатам расчетов построены графики $EI_y/EI_n = f(v)$ (рис. 2, б, сплошные линии) и $\theta = f(EI_y/EI_n)$ (рис. 3), где EI_y – жесткость правой стойки после усиления; EI_n – жесткость поврежденной стойки. По полученным графикам, в зависимости от заданного значения θ и уровня ремонтных напряжений v , можно найти требуемое соотношение жесткостей элементов, при котором несущая способность всей конструкции в целом станет достаточной для восприятия расчетной эксплуатационной нагрузки. Из графиков (рис. 2, б и рис.3) видно, что чем больше уровень ремонтных напряжений v , тем в большей степени требуется увеличивать соотношение жесткостей элементов конструкции после усиления для того, чтобы обеспечить заданную степень восстановления или повышения несущей способности конструкции. Пунктирные линии на графиках $EI_y/EI_n = f(v)$ (рис. 2, б) и $\theta = f(EI_y/EI_n)$ (рис. 3), получены по результатам упругого расчета в соответствии с [2], при разных фиксированных значениях θ и v . Из сравнения этих графиков видно, что полученные по предлагаемой методике соотношения жесткостей элементов рамы, необходимые для обеспечения заданного значения θ , при $v = 0.2 \div 0.6$ от 22% до 40% меньше, чем по результатам упругого расчета согласно [2].

В заключение можно добавить, что предельным случаем применения метода направленного перераспределения жесткостей является случай полного или почти полного выключения из работы поврежденного элемента конструкции. Такое положение, по-видимому, чаще всего будет иметь место при наличии у указанного элемента существенных повреждений. Но даже при таких ситуациях, т.е. когда в материале элемента получили значительные развития пластические деформации, учет его остаточной несущей способности на основе положений изложенных выше, может дать существенный технико-экономический эффект.

Л и т е р а т у р а

1. Будин А.Я. Теоретические основы рациональной эксплуатации и повышения долговечности сельскохозяйственных зданий и сооружений / А.Я. Будин// Проблемы строительства и эксплуатации сооружений агропромышленного комплекса/ Сб. науч. тр. ЛСХИ. – 1987. – С. 4-16.
2. Убайдуллоев М.Н. Усиление статически неопределимых конструкций гидротехнических и мелиоративных сооружений: Дис. ... канд. техн. наук / М.Н. Убайдуллоев – Ленинград-Пушкин, ЛСХИ, 1990. – 213 с.
3. Убайдуллоев М.Н. Влияние пластических деформаций на несущую способность усиливаемых статически неопределимых конструкций / М.Н. Убайдуллоев// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2008. № 4. – С. 28-33.

CALCULATION OF STATICALLY INDETERMINABLE STRUCTURES STRENGTHENED BY THE METHOD OF REDISTRIBUTION OF STIFFNESS

M.N. Ubaydulloyev

The procedure is presented to calculate the effective of strengthening for the statically indeterminate structures reinforced by the method of directed redistribution of stiffness. The dependences by definition of load – carrying capacity of the strengthened structures situated in composite stress state are obtained. The getting results allowing to estimate degree of increase of load – carrying capacity of a strengthened structures at elastic-plastic deformations are presented.

KEY WORDS: strengthening of structures, method of stiffness redistribution, composite stress state, load-carrying capacity of structures, elastic-plastic deformations, equivalent bending moment, longitudinal force.