УДК 69.059.4

© Д. И. Корольков, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: korol9520@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-49-56

© D. I. Korolkov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: korol9520@yandex.ru

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

ESTIMATION OF THE RESIDUAL RESOURCE OF WOODEN STRUCTURES BY THE CHANGES OF THE CROSS SECTION GEOMETRIC PARAMETERS

Предложен метод оценки остаточного ресурса по изменению геометрических параметров деревянных конструкций. Представлена формула для оценки предельного срока эксплуатации в общем виде. Рассмотрен ряд частных случаев при расчете предельного срока эксплуатации по первой группе предельных состояний. В результате выведены формулы для расчета предельного срока службы для различных расчетных случаев: центрально-растянутых, центрально-сжатых, изгибаемых элементов, элементов, подверженных действию осевой силы с изгибом. Рассмотрено определение скорости изменения геометрических параметров на макроуровне (визуально наблюдаемые изменения) и микроуровне (микротрещины, разрывы связей между атомами). Предложены формулы для определения скорости изменения геометрических параметров на макро- и микроуровнях. Приведены достоинства и недостатки данного метода. Указана область его применения.

Ключевые слова: остаточный ресурс, деревянные конструкции, предельное состояние, предельный срок эксплуатации, геометрические параметры.

In this article, the author proposes a method for assessing the residual resource of wooden structures by changes taking place in their geometric parameters. A general formula for estimating the service limit of the wooden structures is presented. Then, a number of special cases are considered when calculating the service limit for the first group of limiting states. As a result, formulas have been derived for calculating the service limit for various design cases, namely, centrally tensioned, centrally compressed members, members under bending, members subjected to the axial force with bending. The author considers the determination of the rate of geometric parameters change at the macro-level (visually observed changes) and micro-level (micro-cracks, breaks of bonds between atoms). Formulas for determining the rate of change of geometric parameters at the macro and micro levels are proposed. The advantages and disadvantages of this method are highlighted, and the scope of its application is indicated.

Keywords: residual resource, wooden structures, limiting state, service limit, geometric parameters.

В настоящее время для оценки остаточного ресурса деревянных конструкций чаще всего применяются два метода.

Первый метод основан на кинетической теории прочности твердых тел, выдвинутой С. Н. Журковым [1–5]:

$$T = \tau_m \cdot \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT} \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (1)$$

где T_m — предельная температура материала, соответствующая его минимальной долговечно-

сти τ_m ; k — постоянная Больцмана; τ_m — минимальная долговечность; U_0 — начальная энергия активации процесса разрушения, равная потенциальному барьеру разрыва химических связей твердых тел, кДж; T — температура, К; σ — напряжение, МПа; γ — структурно-чувствительный коэффициент, кДж/(моль · МПа).

Достоинством этого метода является его универсальность. Он может быть применен к любым строительным конструкциям. Возможность его применения была доказана в многочисленных

экспериментах с различными материалами. В то же время следует отметить, что ряд экспериментальных данных противоречат данной формуле, говорит о том, что в ряде случаев (для ряда материалов) он неприменим. Также не всегда имеется достаточное количество информации о значениях начальной энергии активации процесса разрушения и структурно-чувствительного коэффициента, что требует проведения сложных испытаний, которые могут позволить себе не все организации, проводящие обследования. Следует отметить, что разнообразие вариаций «классической» формулы говорит о том, что она не окончательная, а значит, может претерпеть изменения в будущем на основе новых научных данных.

Второй метод основан на определении длительной прочности древесины, предложен Ф. П. Белянкиным [6]:

$$T = -\frac{1}{b} \ln \frac{\sigma - \sigma_n}{(\sigma_{ар} - \sigma_n)}, \quad (2)$$

где σ — напряжение, МПа; σ_n — предел длительного сопротивления, МПа; $\sigma_{ар}$ — прочность при стандартных испытаниях, МПа; b — постоянная; t — время, сут.

На сегодняшний день данный метод не применяется, поскольку он противоречит проведенным экспериментальным исследованиям. Также положения данного метода противоречат современным теоретическим положениям о прочности твердых тел [7, 8].

Остаточный ресурс равен [9, 10]

$$T_{ост} = T - t_{факт}. \quad (3)$$

В процессе эксплуатации деревянных конструкций происходит изменение размеров поперечного сечения элементов конструкций. В пределе значение данных размеров будет минимально. Такое изменение во времени размеров поперечного сечения элементов протекает с определенной скоростью. Отсюда же следует, что изменяются и другие геометрические характеристики сечения. Предельный же срок эксплуатации будет определяться по формуле

$$T_{пред} = \frac{P_{факт} - P_{min}}{v}, \quad (4)$$

где $P_{факт}$ — значение параметра на настоящий момент контроля технического состояния; P_{min} — минимальное значение параметра; v —

скорость изменения значения параметра во времени.

Скорость изменения параметров поперечного сечения вычисляется по формуле

$$v = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1}, \quad (5)$$

где P_1 — значение параметра в момент контроля t_1 ; P_2 — значение параметра в момент контроля t_2 ; t_1 — момент времени предыдущего контроля; t_2 — момент времени текущего контроля.

Поскольку скорость изменения параметров поперечного сечения неодинакова во времени, то правильнее записать формулу в следующем виде:

$$v = \frac{f(t_2) - f(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (6)$$

где $f(t_2)$ и $f(t_1)$ — значения функции параметра в моменты времени t_2 и t_1 .

В дальнейшем в данной статье в формулах определения предельного срока эксплуатации скорость изменения параметров поперечного сечения будет выражена в виде символа v , поскольку сам закон может быть представлен различными зависимостями и его выбор зависит от конкретного случая.

Формула (4) является общим случаем и может принимать различный вид в зависимости от того, какой параметр поперечного сечения мы приняли.

Далее рассмотрим различные случаи определения предельного срока эксплуатации только для элементов цельного сечения и не имеющих кривизны, при этом только по первой группе предельных состояний. Определение расчетных сопротивлений проводится согласно разделу 6 СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции»¹ и в настоящей статье не рассматривается.

1. Определение остаточного ресурса центрально растянутых элементов

Формула будет иметь следующий вид:

$$T_{пред} = \frac{F_{нт факт} - F_{нт min}}{v}, \quad (7)$$

где $F_{нт факт}$ — фактическая площадь нетто поперечного сечения элемента на момент обследования; $F_{нт min}$ — минимальная площадь нетто поперечного сечения элемента.

¹ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.

Минимальная площадь сечения определяется по формуле

$$F_{\min} = \frac{N}{R_p}, \quad (8)$$

где N — расчетная продольная сила; R_p — расчетное сопротивление древесины растяжению вдоль волокон.

После подстановки в формулу (7) получается:

$$T_{\text{пред}} = \frac{F_{\text{нт факт}} - F_{\text{нт мин}}}{v} = \frac{F_{\text{нт факт}} - \frac{N}{R_p}}{v}. \quad (9)$$

2. Определение остаточного ресурса центрально сжатых элементов

2.1. При расчете на прочность формула аналогична формуле (9):

$$T_{\text{пред}} = \frac{F_{\text{нт факт}} - F_{\text{нт мин}}}{v} = \frac{F_{\text{нт факт}} - \frac{N}{R_c}}{v}, \quad (10)$$

где R_c — расчетное сопротивление древесины сжатию вдоль волокон.

2.2. При расчете на устойчивость формула примет вид

$$T_{\text{пред}} = \frac{\varphi_{\text{факт}} F_{\text{расч. факт}} - \varphi_{\text{мин}} F_{\text{расч мин}}}{v} = \frac{\varphi_{\text{факт}} F_{\text{расч. факт}} - \frac{N}{R_c}}{v}, \quad (11)$$

где $\varphi_{\text{факт}}$ — коэффициент продольного изгиба, соответствующий фактической площади на момент обследования, который определяется по СП 64.13330.2017:

- при гибкости элемента $\lambda \leq 70$:

$$\varphi_{\text{факт}} = 1 - a \left(\frac{\varphi_{\text{факт}}}{100} \right)^2, \quad (12)$$

где коэффициент $a = 0,8$ для древесины и $a = 1,0$ для LVL и фанеры (СП 64.13330.2017);

- при гибкости элемента $\lambda > 70$:

$$\varphi_{\text{факт}} = \frac{A}{\lambda_{\text{факт}}^2}, \quad (13)$$

где коэффициент $A = 3000$ для древесины и $A = 2500$ для фанеры и древесины из однонаправленного шпона (СП 64.13330.2017); $\lambda_{\text{факт}}$ — гибкость элемента при фактической площади на момент обследования определяется по формуле

$$\lambda_{\text{факт}} = \frac{l_0}{r_{\text{факт}}}, \quad (14)$$

где l_0 — расчетная длина элемента, определяемая по формуле

$$l_0 = l \mu_0, \quad (15)$$

где l — свободная длина элемента; μ_0 — коэффициент, определяемый по п. 7.23; $r_{\text{факт}}$ — радиус инерции сечения элемента с максимальными размерами брутто относительно осей x и y при фактической площади; $F_{\text{расч. факт}}$ — фактическая расчетная площадь поперечного сечения элемента (все параметры — см. СП 64.13330.2017).

Таким образом, формула (11) примет вид:

- при гибкости элемента $\lambda \leq 70$:

$$T_{\text{пред}} = \frac{\left(1 - a \left(\frac{l \mu_0}{100 r_{\text{факт}}} \right)^2 \right) F_{\text{расч. факт}} - \frac{N}{R_c}}{v}; \quad (16)$$

- при гибкости элемента $\lambda > 70$:

$$T_{\text{пред}} = \frac{\frac{A r_{\text{факт}}^2}{(l \mu_0)^2} F_{\text{расч. факт}} - \frac{N}{R_c}}{v}. \quad (17)$$

2.3. При расчете на устойчивость центрально-сжатых элементов переменного по высоте сечения формулы (16) и (17) примут вид:

$$T_{\text{пред}} = \frac{\left(1 - a \left(\frac{l \mu_0}{100 \cdot r_{\text{факт}}} \right)^2 \right) F_{\text{расч. факт}} - \frac{N}{R_c k_{жN}}}{v}; \quad (18)$$

$$T_{\text{пред}} = \frac{\frac{A r_{\text{факт}}^2}{(l \mu_0)^2} F_{\text{расч. факт}} - \frac{N}{R_c k_{жN}}}{v}, \quad (19)$$

где $k_{жN}$ — коэффициент, учитывающий переменность высоты сечения, определяемый по табл. Г.2 приложения Г (для элементов постоянного сечения $k_{жN} = 1$) (СП 64.13330.2017).

3. Определение остаточного ресурса изгибаемых элементов

3.1. При расчете по нормальным напряжениям формула будет иметь следующий вид:

$$T_{\text{пред}} = \frac{W_{\text{факт}} - W_{\min}}{v}, \quad (20)$$

где $W_{\text{факт}}$ — фактический расчетный момент сопротивления поперечного сечения элемента на момент обследования; $W_{\min}$ — минимальный расчетный момент сопротивления поперечного сечения элемента, определяемый по формуле

$$W_{\min} = \frac{M}{R_{\text{и}}}, \quad (21)$$

где $R_{\text{и}}$ — расчетное сопротивление изгибу; M — расчетный изгибающий момент (СП 64.13330.2017).

После подстановки в формулу (20) получается

$$T_{\text{пред}} = \frac{W_{\text{факт}} - W_{\text{мин}}}{v} = \frac{W_{\text{факт}} - \frac{M}{R_{\text{и}}}}{v}. \quad (22)$$

3.2. При расчете по скалыванию формула будет иметь вид

$$T_{\text{пред}} = \frac{\left[\frac{S'_{\text{бр}}}{I_{\text{бр}} b_{\text{расч}}} \right]_{\text{факт}} - \left[\frac{S'_{\text{бр}}}{I_{\text{бр}} b_{\text{расч}}} \right]_{\text{мин}}}{v} = \frac{\left[\frac{S'_{\text{бр}}}{I_{\text{бр}} b_{\text{расч}}} \right]_{\text{факт}} - \frac{R_{\text{ск}}}{Q}}{v}, \quad (23)$$

где Q — расчетная поперечная сила; $S'_{\text{бр}}$ — статический момент брутто сдвигаемой части поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси; $I_{\text{бр}}$ — момент инерции брутто поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси; $b_{\text{расч}}$ — расчетная ширина сечения элемента; $R_{\text{ск}}$ — расчетное сопротивление скалыванию при изгибе (СП 64.13330.2017).

3.3. При расчете по косому изгибу

$$T_{\text{пред}} = \frac{\left[\frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \right]_{\text{факт}} - \left[\frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \right]_{\text{мин}}}{v} = \frac{R_{\text{и}} - \left[\frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \right]_{\text{факт}}}{v}, \quad (24)$$

где M_x и M_y — составляющие расчетного изгибающего момента для главных осей сечения x и y ; W_x и W_y — моменты сопротивлений поперечного сечения нетто относительно главных осей сечения x и y (СП 64.13330.2017).

3.4. При расчете на устойчивость плоской формы деформирования изгибаемых элементов прямоугольного постоянного сечения

$$T_{\text{пред}} = \frac{\varphi_{M \text{ факт}} W_{\text{бр факт}} - \varphi_{M \text{ мин}} W_{\text{бр мин}}}{v} = \frac{\varphi_{M \text{ факт}} W_{\text{факт}} - \frac{M}{R_{\text{и}}}}{v}. \quad (25)$$

Коэффициент $\varphi_{M \text{ факт}}$ для изгибаемых элементов прямоугольного постоянного поперечного сечения, шарнирно закрепленных от смещения из плоскости изгиба и закрепленных от поворота вокруг продольной оси в опорных сечениях, следует вычислять по формуле (СП 64.13330.2017):

$$\varphi_{M \text{ факт}} = 140 \frac{b_{\text{факт}}^2}{l_p h_{\text{факт}}} k_{\text{ф}}, \quad (26)$$

где l_p — расстояние между опорными сечениями элемента, а при закреплении сжатой кромки элемента в промежуточных точках от смещения из плоскости изгиба — расстояние между этими точками; $b_{\text{факт}}$ — фактическая ширина поперечного сечения; $h_{\text{факт}}$ — фактическая максимальная высота поперечного сечения на участке l_p ; $k_{\text{ф}}$ — коэффициент, зависящий от формы эпюры изгибающих моментов на участке l_p , определяемый по табл. Е.1 приложения Е (СП 64.13330.2017).

После подстановки формула (25) примет вид

$$T_{\text{пред}} = \frac{\left(140 \frac{b_{\text{факт}}^2}{l_p h_{\text{факт}}} k_{\text{ф}} \right) W_{\text{факт}} - \frac{M}{R_{\text{и}}}}{v}. \quad (27)$$

4. Определение остаточного ресурса элементов, подверженных действию осевой силы с изгибом

4.1. При расчете внецентренно растянутых и растянуто-изгибаемых элементов по нормальным напряжениям

$$T_{\text{пред}} = \frac{\left[\frac{N}{F_{\text{раст}}} + \frac{M_{\text{Д}} R_{\text{р}}}{W_{\text{раст}} R_{\text{и}}} \right]_{\text{факт}} - \left[\frac{N}{F_{\text{раст}}} + \frac{M_{\text{Д}} R_{\text{р}}}{W_{\text{раст}} R_{\text{и}}} \right]_{\text{мин}}}{v} = \frac{R_{\text{р}} - \left[\frac{N}{F_{\text{раст}}} + \frac{M_{\text{Д}} R_{\text{р}}}{W_{\text{раст}} R_{\text{и}}} \right]_{\text{факт}}}{v}, \quad (28)$$

где $M_{\text{Д}}$ — изгибающий момент от действия поперечных и продольных нагрузок, определяемый из расчета по деформированной схеме; $F_{\text{раст}}$ — площадь расчетного сечения нетто (СП 64.13330.2017).

4.2. При расчете на прочность по нормальным напряжениям внецентренно сжатых и сжато-изгибаемых элементов следует выполнять по формуле

$$T_{\text{пред}} = \frac{\left[\frac{N}{F_{\text{раст}}} + \frac{M_{\text{Д}}}{W_{\text{раст}}} \right]_{\text{факт}} - \left[\frac{N}{F_{\text{раст}}} + \frac{M_{\text{Д}}}{W_{\text{раст}}} \right]_{\text{мин}}}{v} = \frac{R_{\text{с}} - \left[\frac{N}{F_{\text{раст}}} + \frac{M_{\text{Д}}}{W_{\text{раст}}} \right]_{\text{факт}}}{v}. \quad (29)$$

4.3. При расчете на прочность по скалыванию сжато-изгибаемых элементов следует выполнять по формуле (23), внецентренно сжатых — по формуле

$$T_{\text{пред}} = \frac{\left[\frac{QS'_{\text{бр}}}{I_{\text{бр}} b_{\text{расч}}} + \frac{0,75 Ne}{bh^2} \right]_{\text{факт}} - \left[\frac{QS'_{\text{бр}}}{I_{\text{бр}} b_{\text{расч}}} + \frac{0,75 Ne}{bh^2} \right]_{\text{мин}}}{v} = \frac{R_{\text{ск}} - \left[\frac{QS'_{\text{бр}}}{I_{\text{бр}} b_{\text{расч}}} + \frac{0,75 Ne}{bh^2} \right]_{\text{факт}}}{v}, \quad (30)$$

где N — расчетная продольная сила; e — эксцентриситет передачи усилия N (СП 64.13330.2017).

4.4. При расчете на устойчивость плоской формы деформирования сжато-изгибаемых элементов

$$T_{\text{пред}} = \frac{1 - \left[\frac{N}{\varphi R_c F_{\text{бр}}} + \left(\frac{M_D}{\varphi_M R_{\text{и}} W_{\text{бр}}} \right)^n \right]_{\text{факт}}}{v}, \quad (31)$$

где $n = 2$ — для элементов без закрепления растянутой зоны из плоскости деформирования и $n = 1$ для элементов, имеющих такие закрепления (СП 64.13330.2017).

После подстановки всех слагаемых согласно п. 7.20 СП 64.13330.2017 формула (31) примет вид

$$T_{\text{пред}} = \frac{1 - \left[\frac{\frac{N}{Ar_{\text{факт}}^2} + \frac{R_c F_{\text{бр}}}{(l_{\mu_0})^2}}{\left(\frac{M_D}{\left(140 \frac{b_{\text{факт}}^2}{l_p h_{\text{факт}}} k_{\text{ф}} \right) R_{\text{и}} W_{\text{бр}}} \right)^n} \right]_{\text{факт}}}{v}. \quad (32)$$

Поскольку расчет предельного срока службы деревянных элементов ведется сразу по нескольким формулам, то за окончательный результат принимается минимальный из полученных.

5. О некоторых моментах расчета предельного срока эксплуатации

Первое, на что следует обратить внимание, — это наличие в ряде формул такой величины, как расчетная длина элемента. При расчете предель-

ного срока службы мы исходим из предположения, что данная величина остается неизменной на протяжении всего срока эксплуатации, т. е., во-первых, схема закрепления элемента не меняется и, во-вторых, изменение собственно свободной длины элемента ничтожно. Это означает, что изменение длины происходит только за счет воздействия внешней среды.

Отсюда же следует, что изменение данной величины путем изменения расчетной схемы и/или уменьшения свободной длины элемента позволит поднять предельный срок эксплуатации, а значит, остаточный ресурс станет больше.

Второе, на что следует обратить внимание, — в расчете не предполагается изменение геометрических параметров в результате искусственного усиления или ослабления поперечного сечения элемента. Получается, что, увеличив сечение элемента, мы тем самым увеличили и предельный срок службы, следовательно, и величину остаточного ресурса.

Третье — в расчете предполагается, что действие поперечных и продольных сил, изгибающих моментов остается неизменным в течение всего срока эксплуатации. При этом важно понимать, что изменение величины усилий в большинстве случаев связано не с простым уменьшением нагрузки как таковой, а с изменением конструктивной схемы и усилением конструкций. Поэтому вопрос повышения остаточного ресурса путем изменения значения усилий нужно рассматривать комплексно.

Достоинством данного метода расчета можно считать то, что мы получаем объективные значения величины предельного срока эксплуатации и, соответственно, остаточного ресурса, поскольку исходные данные получаем при проведении инструментального обследования.

Недостатком же такого подхода можно считать его сложность или же невозможность реализации в ряде случаев на практике.

Непосредственно этот метод можно реализовать тогда, если имеется возможность напрямую измерить изменение геометрических параметров. Например, при гниении древесины, когда можно очистить элемент от сгнившей части.

Здесь проблема делится на две.

Первая проблема связана непосредственно с изменениями геометрических параметров. Не всегда есть доступ к конструкциям. Вторая проблема связана с определением скорости изменения геометрических параметров. Ее можно разделить непосредственно на два уровня: микро- и макроуровень. Макроуровень — это наблюдаемое непосредственно изменение геометрических параметров. Микроуровень — изменения, происходящие внутри элемента и непосредственно не наблюдаемые. Это микротрещины и разрывы связи между атомами.

При рассмотрении скорости изменения геометрических параметров на макроуровне встает вопрос о недостатке данных за прошедший период эксплуатации. Поскольку скорость протекания изменения геометрических параметров неодинакова в различные промежутки времени, то в случае отсутствия данных наблюдения оценка скорости изменения геометрических параметров будет неверной и, соответственно, мы получим неверное значение величины предельного срока эксплуатации.

Для решения этой проблемы важно при организации регулярных технических осмотров фиксировать текущие значения геометрических размеров. В этом случае, имея ряд данных, можно применить регрессионный анализ [11–13] и построить уравнения зависимости изменения геометрических параметров. Полученное уравнение необходимо подставить в формулу (6). В ряде случаев ее можно будет упростить.

Приведем несколько примеров. Выведем формулы для скорости, если нам известны однофакторные уравнения регрессии. Построим уравнения для линейной регрессии и полиномиальной второго порядка:

$$v = \frac{(at_2 + m) - (at_1 + m)}{t_2 - t_1} = \frac{a(t_2 - t_1)}{t_2 - t_1} = a; \quad (33)$$

$$v = \frac{(at_2^2 + bt_2 + c) - (at_1^2 + bt_1 + c)}{t_2 - t_1} = a(t_2 + t_1) + b. \quad (34)$$

Для микроуровня все гораздо сложнее.

Непосредственно наблюдать развитие микротрещин мы не можем, поэтому для оценки скорости развития изменения геометрических параметров можно применить уравнения вида

Аррениуса по термофлуктуационной (кинетической) концепции:

$$v = v_m \exp \left[-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (35)$$

где R — газовая постоянная; γ — структурно-механическая константа; U_0 — максимальная энергия активации; v_m — предельная скорость изменения параметра; T — температура; T_m — предельная температура существования твердого тела; σ — напряжение [14].

В заключение хочется отметить, что несмотря на то, что предложенный метод был рассмотрен для деревянных конструкций, его можно применить и для остальных типов конструкций (железобетонных, металлических, каменных и композитных).

6. Пример расчета для деревянной балки

Исходные данные. Условия эксплуатации 3.1 (влажный режим отапливаемых помещений). Дерево — береза 1-го сорта. $H = 20$ см; $b = 14$ см; $b_{\text{расч}} = 14$ см; $l = 400$ см; $l_0 = 400$ см. Расчетная нагрузка 309 кгс/м. За время эксплуатации ($t = 20$ лет) ширина и высота сечения изменились на 2 см.

Изменение величины момента инерции будет подчиняться линейному уравнению регрессии: $W = -14,267t + 933,33$. Скорость изменения момента инерции будет равна по модулю $v = 14,267$ (согласно уравнению (33)). Выполним расчет по нормальным напряжениям для изгибаемых элементов:

$$\begin{aligned} T_{\text{пред}} &= \frac{W_{\text{факт}} - \frac{M}{R_{\text{и}}}}{v} = \frac{\frac{bh^2}{6} - \frac{q \frac{l^2}{8}}{R_8 m_{\text{дл}} m_{\text{п}} m_{\text{в}} m_{\text{т}} m_{\text{с.с}}}}{14,267} = \\ &= \frac{\frac{14 \cdot 20^2}{6} - \frac{100 \cdot 309 \frac{4^2}{8}}{24 \cdot 0.53 \cdot 1.1 \cdot 0.9 \cdot 1.1 \cdot 10}}{14,267} = \\ &= \frac{933,33 - \frac{61800}{125,928}}{14,267} = \frac{933,33 - 490,7566}{14,267} \approx 31 \text{ год}; \\ T_{\text{ост}} &= T - t_{\text{факт}} = 31 - 20 = 11 \text{ лет}. \end{aligned}$$

Библиографический список

1. Ефимов В. П. Разработка методов определения физических параметров, характеризующих разруше-

ние хрупких материалов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2015. 273 с.

2. Черникова Т. М. Научные основы метода контроля процесса разрушения композитов с использованием электромагнитного излучения: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2014. 319 с.

3. Шевелев В. В., Карташев Э. М. К термофлуктуационной теории хрупкого разрушения материалов // Физика твердого тела. 1989. Т. 31. № 9. С. 71–75.

4. Шевелев В. В., Карташев Э. М. К статистической кинетике хрупкого разрушения материалов // ДАН СССР. 1989. Т. 306. № 6. С. 1425–1429.

5. Шевелев В. В., Карташев Э. М. Кинетика хрупкого разрушения и долговечность материалов // Проблемы прочности. 1990. № 3. С. 9–13.

6. Белянкин Ф. П., Яценко В. Ф. Деформативность и сопротивление древесины. Киев: Изд-во АН УССР, 1957. 86 с.

7. Леонтьев Н. Л. Длительное сопротивление древесины. М.; Л.: Гослесбуиздат, 1957. 132 с.

8. Loebjinski M., Rug W., Pasternak H. Approaches for an optimization of partial safety factors for historic timber structures // Safety, reliability, risk, resilience and sustainability of structures and infrastructure: 12th International conference on structural safety and reliability. Vienna, Austria, Aug. 6–10, 2017. Pp. 683–692.

9. Черных А. Г., Пухаренко Ю. В., Корольков Д. И., Белов В. В. Определение коэффициента А в уравнении оценки остаточного ресурса по возрасту строительных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 82–86. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-82-86.

10. Korolkov D., Chernykh A., Gravit M. Method for Determining the Residual Resource of Building Structures by the Terms of Their Operation // Borodinecs A., Vatin N., Sergeev V. (eds.). Proceedings of EECCE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol 70. Pp. 389–402.

11. Ерофеев В. Т., Старцев О. В., Антошкин В. Д., Гудожников С. С., Самолькина Е. Г., Болдина И. В., Махоньков А. Ю. Оценка изменения прочности древесины в условиях повышенной влажности // Фундаментальные исследования. 2014. № 9–12. С. 2630–2638.

12. Chernykh A., Korolkov D., Nizhegorodtsev D., Kazakevich T., Mamedov Sh. Estimating the residual operating life of wooden structures in high humidity conditions // Architecture and Engineering. 2020. Vol. 5, Issue 1. Pp. 10–19. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-10-19.

13. Chernykh A., Kazakevich T., Kiryutina S., Korolkov D., Nizhegorodtsev D. Qualification tests of adhesive systems, the assessment of the durability of glued wooden structures // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 896. 012036. Vladimir, 27–28 April 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012036.

14. Сузюмов А. В. Методика прогнозирования долговечности фанеры в строительных изделиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2010. 19 с.

References

1. Efimov V. P. *Razrabotka metodov opredeleniya fizicheskikh parametrov, kharakterizuyushchikh razrushenie khrupkikh materialov*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Development of methods for determining the physical parameters that characterize the brittle material's fracture. Dr. Sci. Phys.-Math. diss.]. Novosibirsk, 2015, 273 p.

2. Chernikova T. M. *Nauchnye osnovy metoda kontrolya protsessy razrusheniya kompozitov s ispol'zovaniem elektromagnitnogo izlucheniya*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Scientific bases of the method of control over the process of destruction of composites using electromagnetic radiation. Dr. Sci. Phys.-Math. diss.]. Omsk, 2014, 319 p.

3. Shevelev V. V., Kartashev E. M. *K termofluktatsionnoy teorii khrupkogo razrusheniya materialov* [On the thermofluctuation theory of brittle fracture of materials]. *Fizika tverdogo tela – Solid-State Physics*, 1989, vol. 31, no. 9, pp. 71–75.

4. Shevelev V. V., Kartashev E. M. *K statisticheskoy kinetike khrupkogo razrusheniya materialov* [On the statistical kinetics of brittle fracture of materials]. *DAN SSSR Publ.*, 1989, vol. 306, no. 6, pp. 1425–1429.

5. Shevelev V. V., Kartashev E. M. *Kinetika khrupkogo razrusheniya i dolgovechnost' materialov* [Brittle fracture kinetics and durability of materials]. *Problemy prochnosti – Problems of strength*, 1990, no. 3, pp. 9–13.

6. Belyankin F. P., Yatsenko V. F. *Deformativnost' i soprotivlyaemost' drevesiny* [Deformability and resistance of wood]. Kiev, AN USSR Publ., 1957, 86 p.

7. Leont'ev N. L. *Dlitel'noe soprotivlenie drevesiny* [Long-term resistance of wood]. Moscow; Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1957, 132 p.

8. Loebjinski M., Rug W., Pasternak H. *Approaches for an optimization of partial safety factors for historic timber structures*. Proceedings of the 12-th International conference on structural safety and reliability "Safety, reliability, risk, resilience and sustainability of structures and infrastructure", Aug. 6–10, 2017, Vienna, Austria. Vienna, 2017, pp. 683–692.

9. Chernykh A. G., Pukharensko Yu. V., Korolkov D. I., Belov V. V. *Opredelenie koeffitsienta A v uravnenii otsenki ostatocnogo resursa po vozrastu stroitel'nykh konstruktсий* [Determination of coefficient A in the equation for estimating the residual resource by the age of building structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 5 (82), pp. 82–86. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-82-86.

10. Korolkov D., Chernykh A., Gravit M. *Method for determining the residual resource of building structures by the terms of their operation*. Borodinecs A., Vatin N., Sergeev V. (eds.). Proceedings of EECE 2019, Lecture Notes in Civil Engineering, 2020, vol. 70, pp. 389–402.

11. Erofeev V. T., et al. *Otsenka izmeneniya prochnosti drevesiny v usloviyakh povyshennoy vlazhnosti* [assessment of changes in the strength of wood in conditions of high humidity]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2014, no. 9 (12), pp. 2630–2638.

12. Chernykh A., et al. Estimating the residual operating life of wooden structures in high humidity conditions.

Architecture and Engineering, 2020, vol. 5, iss. 1, pp. 10–19. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-10-19.

13. Chernykh A., et al. Qualification tests of adhesive systems, the assessment of the durability of glued wooden structures. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 896, 012036. Vladimir, 27–28 April 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012036.

14. Suzyumov A. V. *Metodika prognozirovaniya dolgovechnosti fanery v stroitel'nykh izdeliyakh*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Methodology for predicting the durability of plywood in construction products. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Voronezh, 2010, 19 p.