

Найчук А.Я., Петрукович А.Н.

О ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ K_{IC} ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДЕЙСТВИИ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Практика эксплуатации деревянных конструкций показывает, что они не всегда удовлетворяют требованиям надежности и долговечности из-за образования повреждений в виде параллельных волокон трещин. Причинами возникновения указанных повреждений являются: недостаточно полный учет свойств древесины как анизотропного материала при проектировании узловых сопряжений; наличие естественных пороков и концентрации напряжений в узловых сопряжениях; нарушения, связанные с температурно-влажностными условиями эксплуатации и монтажа; несовершенство расчетных предпосылок по оценке несущей способности элементов деревянных конструкций в условиях сложного неоднородного напряженного состояния. Поскольку распространенным видом повреждения элементов деревянных конструкций в процессе их эксплуатации являются трещины, как результат действия внутренних и внешних сил, то и оценка прочности должна осуществляться с учетом способности материала сопротивляться их распространению. Общеизвестно, что такими характеристиками для древесины являются вязкость разрушения при нормальном отрыве K_{IC} и поперечном сдвиге K_{IIC} .

Несмотря на то, что в настоящее время для оценки характеристик вязкости разрушения изотропных материалов в рамках механики разрушения разработан ряд достаточно надежных, апробированных и во многих случаях стандартизированных методов [1,2], для древесины имеются лишь некоторые данные по испытаниям образцов различной формы и

схем нагружения [3-5, 8]. Сопоставление результатов статических испытаний по определению вязкости разрушения для одной и той же породы древесины указывает на их значительные отличия между собой. Основной причиной различий, влияющих на достоверность полученных результатов и их дальнейшую пригодность для расчета на прочность элементов конструкций, является выбор и обоснованность методики по определению вязкости разрушения материалов при относительно простых испытаниях образцов со сквозными трещинами. Поэтому, при определении вязкости разрушения древесины K_{IC} нами была разработана методика, включающая в себя решение следующих вопросов: изготовление образцов, имеющих трещину заданных размеров; создание в образце напряженного состояния с надежно измеряемыми параметрами; обеспечение малости возмущающего влияния трещины на напряженно-деформируемое состояние всего образца; регистрация момента старта трещины и измерения ее длины; регистрация критической нагрузки (деформаций), приводящих к старту трещины и дальнейшему ее развитию; преобразование измеренных величин в константы материала. Описание данной методики приведено в работах [5-7].

Для определения K_{IC} в соответствии с указанной методикой, нами были изготовлены и испытаны образцы, как из цельной, так и из клееной древесины (рис.1). Всего было изготовлено три серии образцов: первая – образцы типа

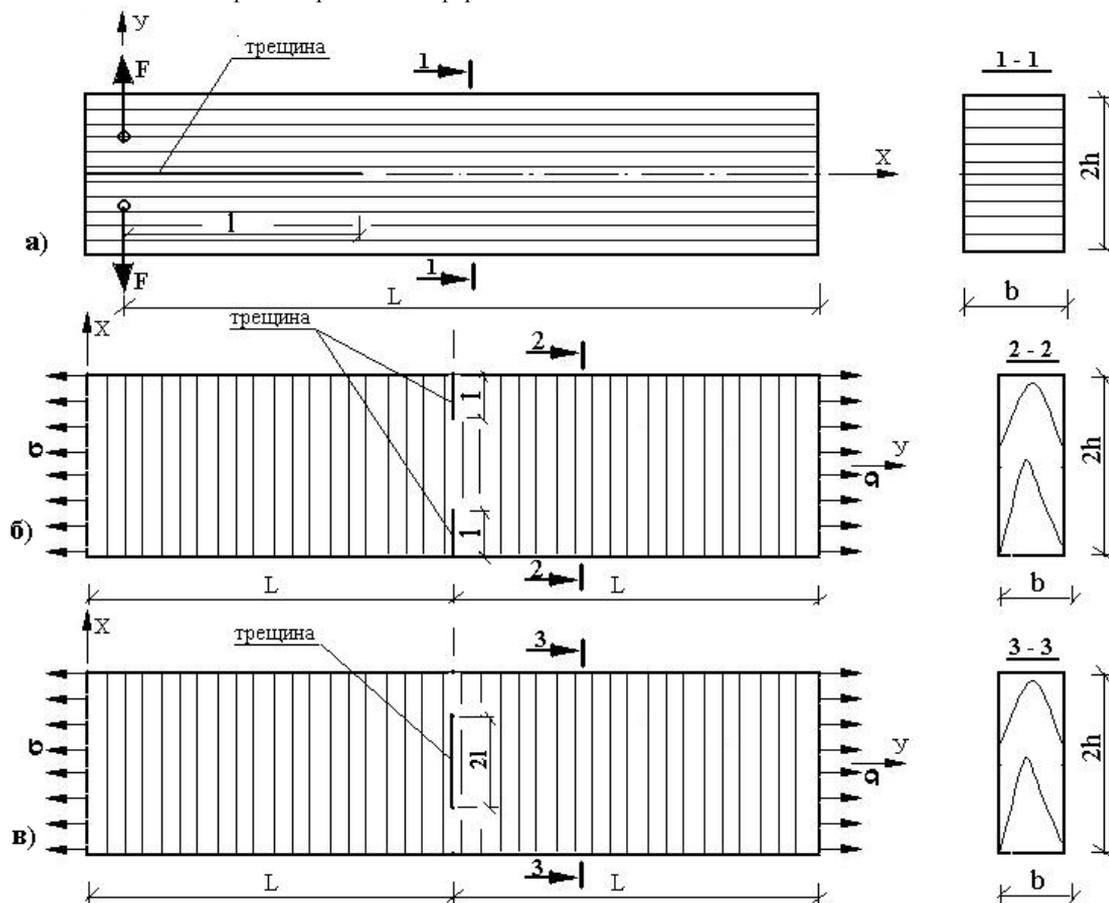


Рис. 1. Общий вид и схемы нагружения образцов с трещинами по определению K_{IC} : а) – образцы серии ДКБ; б) – образцы серии ПК; в) – образцы серии ПЦ.

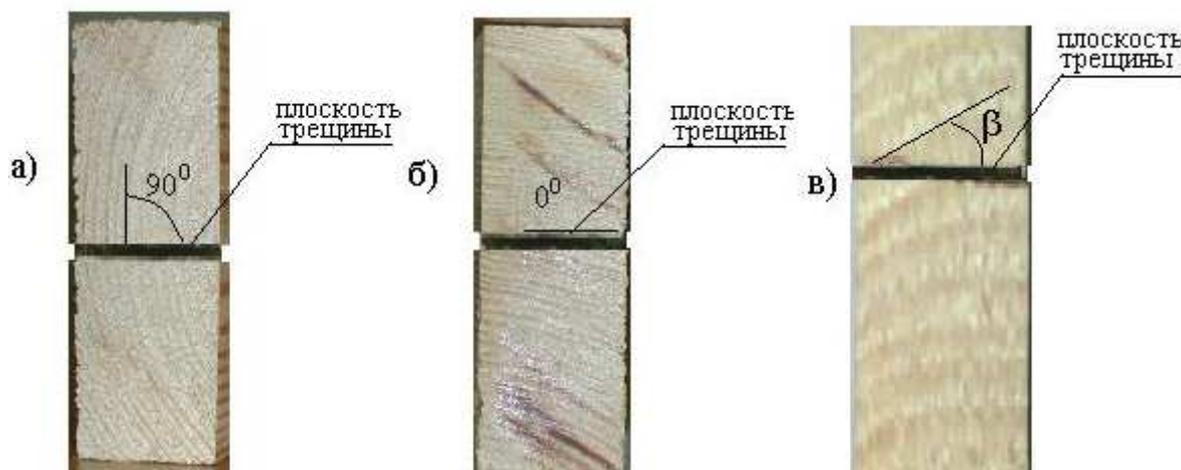


Рис. 2. Системы трещин в образцах: а) – система ТТ; б) – система РП; в) – система с наклоном годовых колец под углом β к плоскости трещины.

двухконсольных балочек (ДКБ-образцы); вторая – в виде прямоугольных пластин с двусторонними краевыми трещинами (ПК); третья – в виде прямоугольных пластин с центральной трещиной (ПЦ). Каждая серия подразделялась на группы в зависимости от толщины поперечного сечения образца.

Образцы серии ДКБ имели длину 600 мм, высоту поперечного сечения – от 110 мм до 140 мм и, в зависимости от толщины b , подразделялись на семь групп. Первая группа ДКБ-образцов соответствовала толщине $b=10$ мм; вторая группа – $b=14,5$ мм; третья группа – $b=20$ мм; четвертая группа – $b=30$ мм; пятая группа – $b=40$ мм; шестая группа – $b=60$ мм и седьмая группа – $b=90$ мм. Кроме того, каждая группа образцов подразделялась на подгруппы в зависимости от системы трещины, т.е. ориентации плоскости трещины по отношению к годичным кольцам в поперечном сечении образца (рис. 2). Если касательная к годичным кольцам в поперечном сечении образца с плоскостью трещины составляла угол 90° , то это соответствовало трещине системы ТТ, а если 0° – то трещине РП, где первая буква показывает направление, нормальное к поверхности трещины, а вторая – направление ее развития (Т – тангенциальное, Р – радиальное, П – продольное). Во всех остальных случаях указывался угол наклона годичных колец β по отношению к плоскости трещины (рис. 2).

Отметим, что для клееной древесины шириной поперечного сечения более 60 мм чаще всего характерны трещины системы РП, поскольку очень редко в клееном пакете встречаются доски радиальной распиловки. При ширине поперечного сечения клееного пакета менее 60 мм, а также при изготовлении образцов для испытаний из клееного пакета, возможны различные системы трещин.

Все ДКБ-образцы изготавливались из цельной древесины за исключением образцов толщиной $b=90$ мм, которые были изготовлены из клееной древесины. Породой древесины для всех образцов являлась сосна. Всего было изготовлено и испытано 83 ДКБ-образца. Влажность древесины образцов составляла $10\% \pm 1\%$. Плотность древесины испытанных образцов находилась в пределах от 460 до 610 кг/м³ и определялась в соответствии с требованиями [9].

Трещина в образце создавалась путем выполнения тонкого пропила вдоль волокон древесины на заданную длину.

Контролируемыми параметрами при испытании ДКБ-образцов являлись: длина трещины l ; величина разрушающей нагрузки F_{max} , соответствующая старту трещины, и перемещение ее берегов u по линии приложения силы. Раз-

рушающая нагрузка F_{max} определялась из диаграммы « $F - u$ ».

Испытание образцов осуществлялось в испытательной машине механического типа марки ИР-5145-500-11 при скорости перемещения активного захвата 0,5 мм/мин. Каждый образец испытывался как минимум при пяти значениях длины трещины. Определение коэффициентов интенсивности напряжений осуществлялось по методу податливости [10], согласно которому скорость освобождения энергии определяется уравнением:

$$G_{IC} = \frac{F_{max}^2}{2b} \frac{\partial \lambda}{\partial l}, \quad (1)$$

где F_{max} – нагрузка, соответствующая началу роста трещин;

$\lambda = \frac{u_{max}}{F_{max}}$ – податливость образца; b – толщина образца;

$\partial \lambda / \partial l$ – скорость изменения податливости по отношению к длине трещины.

Для каждого испытанного образца выполнялась аппроксимация $\lambda(l)$ и $F(l)$, а величина вязкости разрушения K_{IC} определялась из выражения

$$G_{IC} = c_1 K_{IC}^2, \quad (2)$$

$$\text{где } c_1 = \left(\frac{a_{11} a_{22}}{2} \right)^{1/2} \left[\left(\frac{a_{22}}{a_{11}} \right)^{1/2} + \frac{2a_{12} + a_{66}}{2a_{11}} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\text{а } a_{11} = 1/E_x; \quad a_{22} = 1/E_y;$$

$$a_{12} = -\nu_{xy}/E_y = -\nu_{yx}/E_x; \quad a_{66} = 1/G_{xy}; \quad (4)$$

E_x, E_y – модуль упругости вдоль и поперек волокон древесины; G_{xy} – модуль сдвига; ν_{yx}, ν_{xy} – коэффициенты поперечной деформации.

С целью оценки влияния скорости нагружения и влажности древесины на K_{IC} было дополнительно испытано 5 ДКБ-образцов толщиной 30 мм при скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин и 9 образцов с влажностью древесины $W=18\%$ при скорости 0,5 мм/мин.

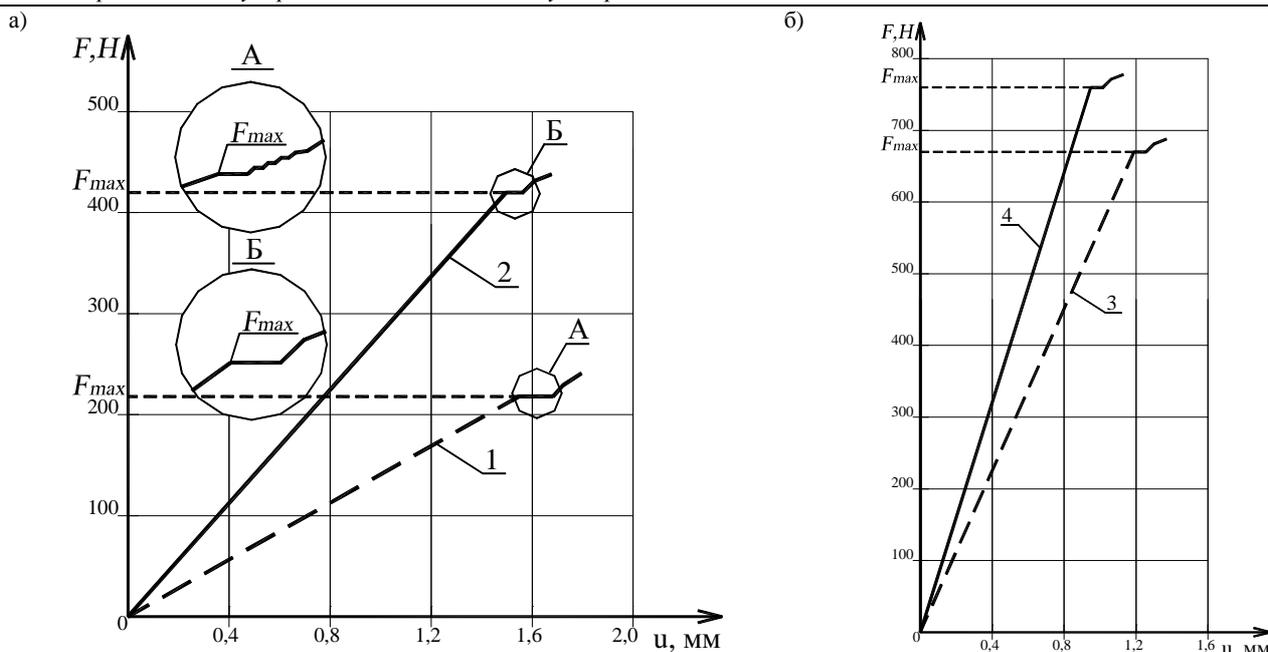


Рис. 3. Диаграммы перемещений берегов трещины по линии действия силы при испытании ДКБ-образцов: а) – для трещин системы ТП; б) – для трещин системы РП; 1 – при толщине 10 мм и длине трещины 175,5 мм; 2 – при толщине 20 мм и длине трещины 175,5 мм; 3 – при толщине 40 мм и длине трещины 177 мм; 4 – при толщине 90 мм и длине трещины 177 мм.

Анализируя диаграммы «F-u», можно отметить, что для всех образцов древесина работала линейно вплоть до старта трещины (рис.3). Появление горизонтальных пилообразных участков на диаграммах «F-u» при испытании образцов толщиной 10 мм объясняется тем, что их толщина была недостаточной. Здесь, при разрушении, в большей степени сказывалась неоднородность древесины по толщине образца, обусловленная тем, что разрыв волокон поздней древесины по годичным кольцам при тангенциальной распиловке происходил не одновременно и приводил к небольшим приростам трещины при нагрузках, близких к максимальным. В образцах толщиной 14,5 мм и более влияние структуры материала не сказывалось на характере диаграмм.

Испытание плоских образцов с центральной и двусторонними краевыми трещинами (рис. 1) проводилось с целью проверки результатов, полученных при испытании ДКБ-образцов. Всего было испытано 10 образцов серии ПЦ размерами $2L \times 2h \times b = 230 \times 100 \times 15$ мм с длиной трещины $2l = 40$ мм и 9 образцов серии ПК размерами $L \times 2h \times b = 400 \times 90 \times 30$ мм с длиной трещины $l = 27$ мм. Образцы серии ПЦ изготавливались из цельной, а серии ПК – из клееной древесины. Влажность древесины для данных образцов составляла 10%. Вязкость разрушения древесины K_{IC} для данной серии образцов определялась по формуле

$$K_{IC} = Y_I \frac{F_{max}}{2hb} \sqrt{\pi l}, \quad (5)$$

где F_{max} – усилие, соответствующее старту трещины; $2h$ и b – соответственно высота и толщина поперечного сечения образца (рис.1); l – длина трещины; π – константа; Y_I – безразмерный коэффициент интенсивности напряжений, учитывающий геометрические размеры образцов, длину трещины и численно равный для образцов серии ПЦ:

$$Y_I = 0,8413 + 1,626 \frac{l}{h} - 4,1317 \left(\frac{l}{h}\right)^2 + 4,4175 \left(\frac{l}{h}\right)^3, \quad (6)$$

а для образцов серии ПК:

$$Y_I = 1,0309 + 1,2387 \frac{l}{h} - 8,9002 \left(\frac{l}{h}\right)^2 + 27,581 \left(\frac{l}{h}\right)^3 - 36,8858 \left(\frac{l}{h}\right)^4 + 19,0476 \left(\frac{l}{h}\right)^5 \quad (7)$$

Функциональные зависимости (6) и (7) были получены при расчете экспериментальных образцов по разработанной программе, в основу которой положен МКЭ и реализованы процедуры определения коэффициентов интенсивности напряжений, как прямым методом (по перемещениям в вершине трещины) [11], так и через компоненты потока энергии J_X и J_Y [10].

В результате выполненных исследований было установлено, что для древесины сосны вязкость разрушения K_{IC} зависит от системы расположения трещины по отношению к годичным кольцам, плотности древесины и толщины образцов. Для более полного представления зависимости вязкости разрушения K_{IC} от плотности древесины и толщины образцов была выполнена аппроксимация среднестатистических значений K_{IC} с обеспеченностью $p = 0,95$ в диапазоне толщин от 10 до 100 мм, которая представлена на рис. 4.

Анализ зависимости (рис.4) показывает, что с увеличением толщины образцов до 60мм вязкость разрушения древесины уменьшается, а при толщине более 70 мм наблюдается незначительное увеличение. Уменьшение вязкости разрушения древесины K_{IC} в интервале толщины от 10 мм до 60 мм объясняется изменением напряженно-деформированного состояния древесины и формы фронта трещины. В тонких образцах толщиной 10 мм и менее имеет место случай, близкий к плоскому напряженному состоянию, а в образцах толщиной несколько десятков миллиметров – плоской деформации. Отметим, что в образцах толщиной 10 мм вязкость разрушения для системы трещин РП была ниже на 15 – 20%, чем для системы трещин ТП. Объяснением этому служит то, что плоскость трещины в образцах толщиной 10 мм пересекала древесину только раннего годичного слоя, обладающей значительно меньшей прочностью и плотностью по сравнению с древесиной позднего слоя. Для образцов толщиной 70 мм и

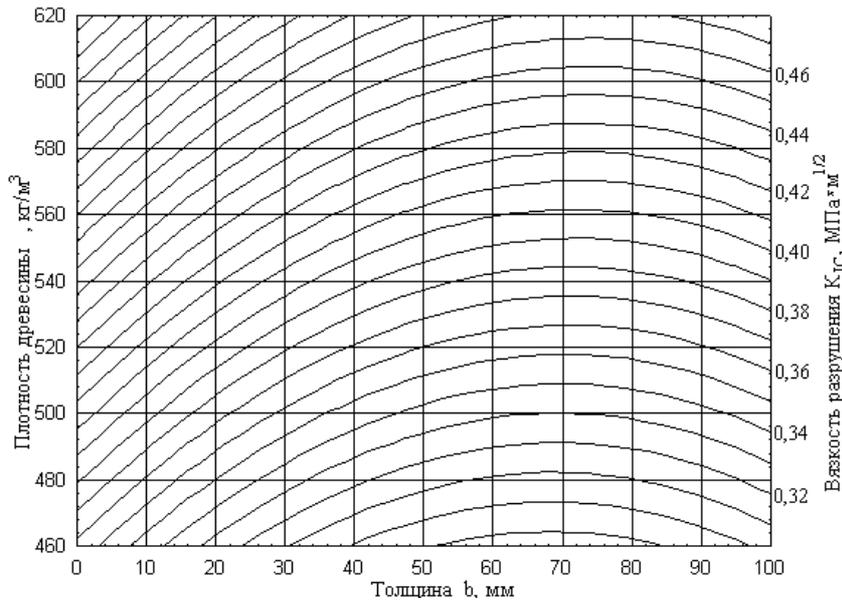


Рис. 4. Зависимость вязкости разрушения K_{IC} от плотности древесины и толщины ДКБ-образцов.

более в основном характерны трещины системы РП. В указанных образцах плоскость трещины пересекала несколько годовичных колец как ранней, так и поздней древесины, кроме того, на величину разрушающей нагрузки оказывал влияние эффект «армирования» радиально идущими лучами из паренхимных клеток, что не характерно для образцов с трещинами системы ТП. Поэтому, на графике рис.4, в интервале толщин от 60 до 100 мм наблюдается незначительное увеличение вязкости разрушения K_{IC} .

При увеличении плотности древесины вязкость разрушения K_{IC} возрастает независимо от системы трещины. Следует отметить, что подобная зависимость в известной степени характерна и для прочностных характеристик древесины, что объясняется увеличением толщины стенок клеток поздних трахейд.

Как показали результаты экспериментальных исследований, вязкость разрушения древесины K_{IC} при изменении влажности в интервале от 10% до 18% практически не изменялась, несмотря на снижение упругих характеристик древесины при увеличении влажности. Так, для ДКБ-образцов толщиной 30 мм с трещиной системы ТП плотностью 480 кг/м^3 и влажностью древесины 10 % $K_{IC} = 0,335 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, а при влажности древесины 18% $K_{IC} = 0,339 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Это можно объяснить специфическим влиянием воды на молекулярную структуру древесины и, как следствие, вовлечением большего объема материала в высокоэластические деформации в вершине трещины. Что же касается изменения скорости нагружения образцов от 0,5 мм/мин до 5 мм/мин, величина K_{IC} была постоянной. Так, для ДКБ-образцов толщиной 30 мм с трещиной системы ТП плотностью 530 кг/м^3 и влажностью древесины 10 % при скорости нагружения 0,5 мм/мин $K_{IC} = 0,427 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, а при скорости нагружения 5 мм/мин $K_{IC} = 0,43 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$.

Для образцов в виде пластинок толщиной 15 мм с центральной трещиной системы ТП и плотностью древесины 460 кг/м^3 $K_{IC} = 0,30 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, а для образцов с двусторонними краевыми трещинами и плотностью древесины 550 кг/м^3 $K_{IC} = 0,42 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Сопоставляя данные результаты с соответствующими значениями вязкости разрушения древесины для ДКБ-образцов (рис.4) можно сделать вывод об их достоверности, поскольку полученные значения близки по величине и находятся в пределах доверительных интервалов.

Таким образом, полученная экспериментальным путем зависимость вязкости разрушения для древесины сосны (рис.4) может быть использована при оценке прочности элементов деревянных конструкций с повреждением в виде сквозных трещин, а также для определения нормативных значений вязкости разрушения древесины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 25-506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Издат. стандартов, 1985. – 61 с.
2. ГОСТ 29167-91 Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1992, – 18 с.
3. Найчук А.Я. К вопросу оценки вязкости разрушения древесины. Тез. докл. научно-практической конференции молодых ученых и специалистов ЦНИИПромзданий. – М., 1986. – С. 9
4. Найчук А.Я., Федоров А.В. К вопросу оценки хрупкого разрушения древесины. В кн.: Молодежь и научно-технический прогресс в строительстве. Тез. докл. – Новосибирск, 1987. – С. 21.
5. Найчук А.Я. Методика определения вязкости разрушения древесины K_{IC} . – В кн.: Экспериментальные исследования и расчет строительных конструкций.: Сб. науч. тр. ЦНИИПромзданий. – М.: 1992, с. 63-70.
6. Найчук А.Я., Драган В.И., Петрукович А.Н. Методика экспериментального определения характеристик трещиностойкости древесины на ДКБ-образцах. //Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2004. – № 1(25). с. 85-88.
7. Найчук А.Я., Петрукович А.Н. Применение метода калибровки подагливости для определения трещиностойкости древесины. //Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2004. – № 1(25). С. 88-91.
8. Кабанов В.А., Масалов А.В. Вязкость разрушения деревянных клееных элементов Межвуз. сб. тр. Санкт-Петербургского архитектурно-строительного университета. – Санкт-Петербург, 1995 – С.78-88.
9. ГОСТ 16483.1-84 Древесина. Метод определения плотности. – Москва: Изд-во стандартов, 1984, – 6 с.
10. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – Москва.: Наука, 1974, - 640 с.
11. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – Москва.: Наука, 1980, – 254 с.