

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 631.658

DOI: 10.18324/2077-5415-2017-4-134-138

### Теоретико-экспериментальные исследования механизма разрушения устройства для извлечения ядер из кедровых орехов

П.В. Бырдин<sup>а</sup>, В.А. Вовк<sup>б</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>а</sup>byrdin\_pavel@mail.ru, <sup>б</sup>victor-vovk@mail.ru

Статья получена 11.09.2017, принята 3.10.2017

*Кедровые орехи относятся к одним из наиболее популярных в нашей стране и во всем мире. В состав кедровых орехов входят жиры, белки, углеводы в виде крахмала и сахара, органические кислоты, дубильные вещества, витамины, а также минеральные вещества. Биологическая ценность кедровых орехов обусловлена высоким содержанием витаминов В<sub>1</sub> и Е. С целью совершенствования технологии переработки и повышения производительности технологического оборудования разработано устройство для разрушения скорлупы кедровых орехов, основной особенностью которого является наличие механизма разрушения. В статье представлены результаты теоретического исследования сил, действующих на скорлупу ореха в процессе его прохождения через механизм разрушения упомянутого устройства. Установлено, что максимальная сила раскалывания скорлупы  $P_{max}$  зависит от удельного сопротивления раскалыванию  $k$ , длины и толщины раскалываемой части скорлупы кедрового ореха,  $b$  и  $h$  соответственно, и угла заострения клина ножа  $\alpha$ . Представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных с целью определения толщины скорлупы кедрового ореха. Согласно схеме эксперимента, в микрометр поочередно помещалась часть скорлупы, после чего проводились замеры ее толщины. Полученные значения проходили статистическую обработку с целью выявления характера распределения. Было установлено, что распределение значений толщины скорлупы описывается нормальным законом. В результате исследований определено среднее значение толщины, которое составило 0,53 мм. Для определения оптимальных параметров ножа для раскалывания скорлупы кедрового орехопостроены зависимости силы раскалывания от расстояния между ножами и углом  $\alpha$ .*

**Ключевые слова:** кедровый орех; уникальный продукт; механизм разрушения; скорлупа ореха; сила раскалывания.

### Theoretical and experimental studies of the fracture mechanism of the device for the extraction of kernels from pine nuts

P.V. Byrdin<sup>a</sup>, V.A. Vovk<sup>b</sup>

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup>byrdin\_pavel@mail.ru, <sup>b</sup>victor-vovk@mail.ru

Received 11.09.2017, accepted 3.10.2017

*Pine nuts are one of the most useful nuts in our country and all over the world. The composition of pine nuts include fats, proteins, carbohydrates in the form of starch and sugar, organic acids, tannins, vitamins, and minerals. The biological value of pine nuts is determined by the high content of vitamin B<sub>1</sub> and vitamin E. With the purpose of improving the technology of processing pine nuts and increasing the productivity of technological equipment, an analysis is made and a device for destroying the pine nutshell is developed, the main feature of which is the presence of a fracture mechanism. The paper presents the results of theoretical studies of the forces acting on the nutshell during its passage through the fracture mechanism. It has been established that the maximum cleavage force of the shell  $P_{max}$  depends on the specific resistance to splitting  $k$ , the length and thickness of the cleaved part of the pine nut shell,  $b$  and  $h$ , respectively, and the sharpening angle of the wedge  $\alpha$ . The results of experimental studies carried out with the aim of determining the thickness of the pine nut shell are presented. According to the scheme of the experiment, a part of the pine nut shell was alternately placed in the micrometer, after which measurements of its thickness were made. The values obtained were subjected to statistical processing to determine the nature of the distribution. It was found that the distribution of thickness values of the shell is described by the normal law. As a result of the studies, the average thickness value, which was 0.53 mm, is determined. To determine the optimal parameters of the knife for splitting the pine nutshell, the dependence of the splitting force on the distance between the knives and the angle  $\alpha$  is constructed.*

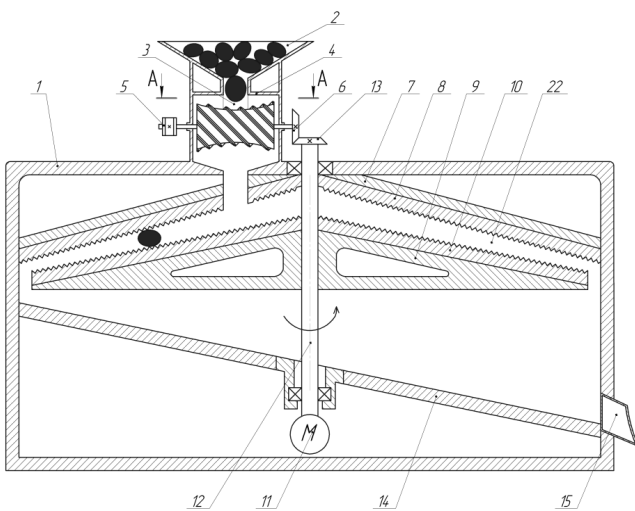
**Keywords:** pine nut; unique product; fracture mechanism; nutshell; splitting force.

**Введение**

Кедровые орехи относятся к одним из наиболее популярных в нашей стране и во всем мире [1]. В состав кедровых орехов входят жиры, белки, углеводы в виде крахмала и сахара, органические кислоты, дубильные и минеральные вещества, витамины. Биологическая ценность кедровых орехов обусловлена высоким содержанием витаминов В<sub>1</sub> и Е. Ценным элементом кедровых орехов являются липоиды, особенно фосфотиды. Общее их содержание составляет в среднем около 1,3 %, что выше, чем у целого ряда масличных культур, и равноценно сое — наиболее богатому источнику фосфатидов среди растительного сырья [2–5]. Кроме того, в ядрах кедровых орехов содержится значительное количество минеральных веществ. Высокое содержание жира (растительного масла), богатого витаминами, предопределяет их переработку с получением высококачественного кедрового масла для пищевых, медицинских и технических целей [6–10].

**Постановка задачи.** Для переработки кедрового ореха и получения полезных продуктов необходимо реализовать большое число технологических процессов, начиная со сбора кедровой шишки и заканчивая извлечением из кедрового ореха ядер и получением растительного масла [11]. Самым технически сложным процессом является извлечение ядер из кедрового ореха. Существующее оборудование не обеспечивает получение качественного ядра, что сказывается на дальнейшей производительности технологического процесса [12–16].

С целью повышения качества продукции и производительности было разработано устройство для извлечения ядер из кедровых орехов. Общий вид устройства представлен на рис.1. Основной особенностью этого устройства является наличие механизма разрушения, позволяющего раскалывать скорлупу кедровых орехов и повысить таким образом производительность устройства с сохранением качества продукта.

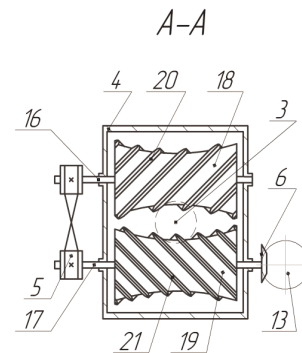


**Рис. 1.** Общий вид устройства для извлечения ядер из кедровых орехов

Устройство для разрушения скорлупы кедровых орехов состоит из корпуса 1 с установленным в нем загрузочным бункером 2 и орехопроводом 3, механизма

разрушения 4 (рис. 2) с перекрестной ременной передачей 5 и ведомой конической шестерней 6, металлической крышки 7 с выступами 8, конусообразного диска 9 с выступами 10, мотора 11, вала 12 с ведущей конической шестерней 13, направляющей 14 и выпускного патрубка 15.

Механизм разрушения 4 расположен под орехопроводом 3 и выполнен в виде двух параллельно расположенных валов 16 и 17 с установленными на них металлическими вальцами 18 и 19, имеющими форму однополосного гиперболоида с расположенными на поверхности ножами, выполненными в виде заостренных металлических навивок 20 и 21. Навивка 20 вальца 18 выполнена в направлении, обратном навивке 21 вальца 19. Вал 17 одним своим концом соединен с валом 16 через перекрестную ременную передачу 5, а на другом конце вала 17 жестко установлена ведомая коническая шестерня 6.



**Рис. 2.** Механизм разрушения, вид А-А

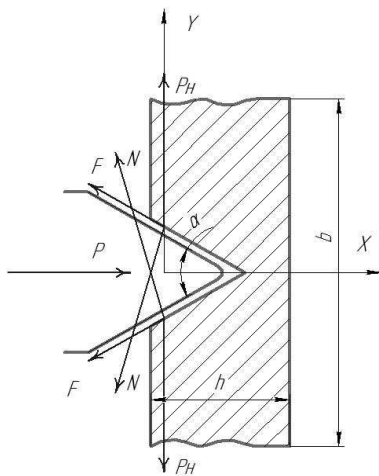
Металлическая крышка конусообразной формы 7 жестко установлена в корпусе 1. Конусообразный диск 9 установлен в корпусе 1 на ведущем валу 12 таким образом, что образующийся зазор 22 между крышкой 7 и конусообразной поверхностью диска 9 уменьшается по направлению от центра диска 9 к его краю. Направляющая 14 выполнена в форме эллипса и жестко установлена в корпусе 1 устройства под острым углом к горизонту таким образом, что нижняя ее часть сообщается с выпускным патрубком 15.

Устройство для разрушения скорлупы работает следующим образом. Кедровые орехи засыпаются в загрузочный бункер 2, откуда через орехопровод 3 под действием силы тяжести поступают в механизм разрушения 4. При включении мотора 11 крутящий момент с вала 12 и ведущей конической шестерни 13 передается на ведомую коническую шестерню 6 и приводит в движение вал 17. Вращение вала 17 через перекрестную ременную передачу 5 передается на вал 16 таким образом, что установленные на валах 16 и 17 металлические вальцы 18 и 19 начинают вращаться навстречу друг другу. Расположенные на поверхности вальцов 18 и 19 заостренные металлические навивки 20 и 21 обеспечивают самозатягивание ореха и дальнейшее его протаскивание между вальцами 18 и 19. В процессе протаскивания ореха происходит повреждение его боковой поверхности навивками 20, 21 и частичное или полное разрушение скорлупы. Далее орех с поврежденной скорлупой поступает в зазор 22 меж-

ду конусообразным диском 9 и неподвижной крышкой 7, под действием центробежных и гравитационных сил продвигается по конусу вращающегося диска 9 и подвергается воздействию металлических выступов 8 и 10, что приводит к полному разрушению скорлупы. После этого под действием центробежной силы орех и очищенная скорлупа попадают на направляющую 14 и высыплются из корпуса 1 через выпускную патрубков 15.

Положительный результат действия предлагаемого устройства заключается в повышении качества очистки орехов за счет нарушения целостности их скорлупы [17–18].

**Методика исследований.** Составим схему сил, действующих на орех при взаимодействии с механизмом разрушения (рис. 3) [19–20].



**Рис. 3.** Схема сил, действующих на скорлупу ореха при взаимодействии с механизмом разрушения:  $P$ —сила раскалывания;  $N$ —сила со стороны скорлупы;  $F$ —сила трения;  $P_n$ —сила разрушения связей скорлупы;  $\alpha$  — угол заострения клина

Согласно схеме, представленной на рис.3, составим уравнение действия сил по оси X:

$$\sum F_x = 0; \quad (1)$$

$$P_{max} - 2F \cdot \cos(0,5\alpha) - 2N \cdot \sin(0,5\alpha) = 0$$

Разрушение связей скорлупы по плоскости раскалывания происходит под действием сил  $P_n$ , направленных перпендикулярно этой плоскости. Составим уравнение действия сил по оси Y:

$$\sum F_y = 0; \quad (2)$$

$$P_n - N \cdot \cos(0,5\alpha) + F \cdot \sin(0,5\alpha) = 0$$

Решая совместно эти два уравнения и принимая  $F = \mu N$  (где  $\mu$ —коэффициент трения щек ножа о скорлупу), получаем:

$$P_{max} = \frac{2P_n \cdot [\mu + \operatorname{tg}(0,5\alpha)]}{[1 - \mu \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha)]}. \quad (3)$$

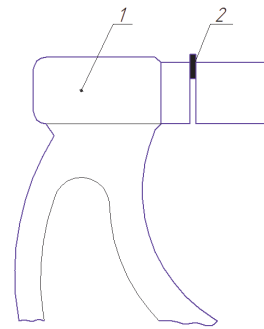
Величину  $P_n$  определяют по формуле  $P_n = k \cdot b \cdot h$ , следовательно:

$$P_{max} = 2 \cdot k \cdot b \cdot h \cdot \frac{[\mu + \operatorname{tg}(0,5\alpha)]}{[1 - \mu \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha)]}. \quad (4)$$

где  $k$ —удельное сопротивление раскалыванию,  $H/m^2$ ;  $b$  и  $h$ — соответственно длина и толщина раскалываемой части скорлупы кедрового ореха,  $m$ .

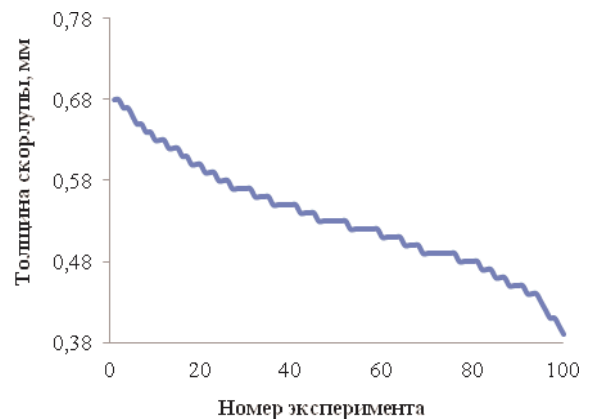
С целью определения необходимого максимального усилия для раскалывания были проведены с помощью микрометра «211221» лабораторные исследования по определению толщины скорлупы кедрового ореха.

Принципиальная схема лабораторных исследований представлена на рис.4.



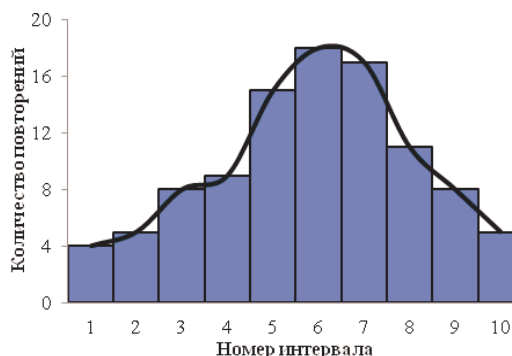
**Рис. 4.** Принципиальная схема экспериментальных исследований: 1—микрометр; 2—скорлупа кедрового ореха

В процессе эксперимента в микрометр 1 поочередно помещалась часть скорлупы кедрового ореха, после чего проводились замеры ее толщины. Значения с микрометра фиксировались, затем эксперимент повторялся. В конце эксперимента ручным подсчетом значений толщины скорлупы была выявлена генеральная совокупность (рис. 5), которая в дальнейшем была исследована на определение характера распределения.



**Рис. 5.** Статистический ряд значений толщины скорлупы кедрового ореха

На основании полученных данных был построен график плотности распределения значений толщины скорлупы (рис.6).

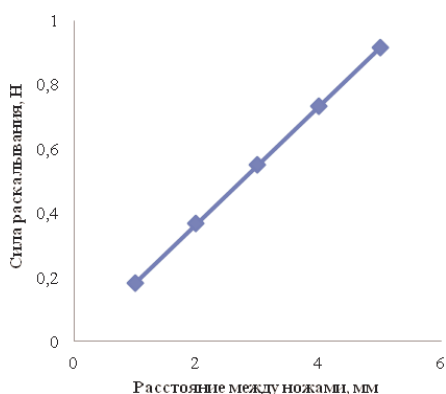


**Рис. 6.** График плотности распределения значений толщины скорлупы кедрового ореха

На основании полученного графика (рис. 6), выдвигем гипотезу о нормальном распределении значений толщины скорлупы кедрового ореха. Для подтверждения или опровержения данной гипотезы проведем проверку по критерию согласия Пирсона  $\chi^2$ . Результаты проверки представлены в таблице.

*Результаты расчеты экспериментальных значений толщины скорлупы кедрового ореха*

№ интервала	Нижняя граница интервала	Верхняя граница интервала	$m_i$	$X_{ср. инт.}$	$m^*$	S	Pi	$mT$
1	0,39	0,42	5	0,405	0,529	0,676	0,027	2,7
2	0,42	0,45	8	0,435			0,065	6,5
3	0,45	0,48	11	0,465			0,094	9,4
4	0,48	0,51	17	0,495			0,143	14,3
5	0,51	0,54	18	0,525			0,151	15,1
6	0,54	0,57	15	0,555			0,167	16,7
7	0,57	0,6	9	0,585			0,104	10,4
8	0,6	0,63	8	0,615			0,068	6,8
9	0,63	0,66	5	0,645			0,023	2,3
10	0,66	0,68	4	0,67			0,035	3,5



**Рис. 7.** График зависимости углового ускорения от геометрических параметров диска, его массы(*a*) и радиуса (*b*)

$$\chi^2_{рас.} = 7,46$$

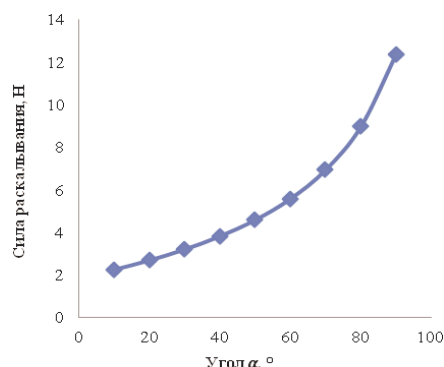
Табличный критерий согласия Пирсона  $\chi^2_{таб.}$  определяется по табл.П.4 [4] и при уровне значимости  $q = 0,05$  и числе степеней свободы  $f = 7$  составит:

$$\chi^2_{таб.} = 14,1$$

$$7,46 < 14,1$$

Тождество выполняется, следовательно, гипотеза о нормальном распределении значений толщины скорлупы кедрового ореха подтверждается. Из полученных исследований делаем вывод о том, что среднее значение толщины скорлупы кедрового ореха равно 0,53 мм.

Для определения оптимальных параметров ножа для раскалывания скорлупы кедрового ореха, были проанализированы зависимости силы раскалывания от расстояния между ножами и углом  $\alpha$ .



**Рис. 8.** График зависимости углового ускорения от геометрических параметров диска, его массы(*a*) и радиуса (*b*)

**Основные выводы**

На графике(рис. 7)видно, что при увеличении расстояния между ножами с 1 до 6 мм происходит пропорциональное увеличение силы, действующей со стороны ножа.

Из графика на рис. 8 следует, что при увеличении угла  $\alpha$  с 10 до 50°, происходит равномерное увеличение необходимой силы для раскалывания скорлупы. С изменением угла  $\alpha$  с 50 до 90° происходит резкое увеличение силы для раскалывания. Следовательно, при величине угла  $\alpha$  от 10 до 50° работа устройства будет наиболее стабильна.

*Литература*

1. Бех И.А. Перспективы освоения ресурсов кедрового ореха в лесах Сибири // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер. Биология. 2008. Т. 1, № 4. С. 414-421.



## References

2. Lin S., Xue P., Zhang S., Dong X., Liang R., Liu Z. Antioxidant activity improvement of identified pine nut peptides by pulsed electric field (pef) and the mechanism exploration // *LWT - Food Science and Technology*. 2017. Vol. 75. P. 366-372.
3. Zhao T., Hong S.I., Yoon S.W., Kim I.-H., Kim B.H., Kim C.-T., Kim Y. Lipase-catalyzed production of pinolenic acid concentrate from pine nut oil using a recirculating packed bed reactor // *Jour. of Food Science*. 2012. Vol. 77, № 2. P. 267-271.
4. Lee B.-M., Choi J.-H., Hong S.I., Yoon S.W., Kim I.-H., Kim B.H., Kim C.-T., Kim C.-J., Kim Y. Enrichment of pinolenic acid from pine nut oil via lipase-catalyzed ethanolysis with an immobilized candida antarctica lipase // *Biocatalysis and Bio-transformation*. 2011. Vol. 29, № 4. P. 155-160.
5. Ballin N.Z., Mikkelsen K. Polymerase chain reaction and chemometrics detected several pinus species including pinus armandii involved in pine nut syndrome // *Food Control*. 2016. Vol. 64. P. 234-239.
6. Xie K., Miles E.A., Calder P.C. A review of the potential health benefits of pine nut oil and its characteristic fatty acid pinolenic acid // *Jour. of Functional Foods*. 2016. Vol. 23. P. 464-473.
7. Мазалевский В.Б., Нициевская К.Н., Мотовилов О.К. Методические подходы к созданию продуктов из ядра кедрового ореха // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2015. № 6 (247). С. 76-81.
8. Егорова Е.Ю., Баташова Н.В., Бочкарев М.С. Биологическая ценность и функционально-технологические свойства жмыха ядра кедрового ореха // *Масложировая промышленность*. 2007. № 6. С. 41-44.
9. Бузетти К.Д., Умарова З.М., Люсионь Д.Л., Грызенков А.В. Получение спиртового настоя из кедровых орехов ускоренным способом в рециркуляционных // *Технологии 21 века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности*. 2012. № 6-1. С. 2.
10. Mikkelsen A.T., Jessen F., Ballin N.Z. Species determination of pine nuts in commercial samples causing pine nut syndrome // *Food Control*. 2014. Vol. 40, № 1. P. 19-25.
11. Егорова Е.Ю., Будаева В.В., Лобанова А.А., Ильясов С.Г. Скорлупа кедрового ореха в производстве алкогольных и безалкогольных напитков // *Пиво и напитки*. 2005. № 5. С. 44-46.
12. Бырдин П.В., Михальский Д.В., Борейкина Е.М. Устройство для шелушения кедровых шишек с их предварительной термической обработкой: пат. 2491010 Рос. Федерация № 201147697/13; заяв. 23.11.11; опубл. 27.08.13, Бюл. № 24.
13. Невзоров В.Н., Корнеев С.В. Устройство для извлечения ядер кедрового ореха: пат. 2332913 Рос. Федерация № 2006145690/13; заяв. 21.12.06; опубл. 10.09.08, Бюл. № 25.
14. Невзоров В.Н., Куриленко Н.И., Голубев И.В. Устройство для разрушения скорлупы кедрового ореха: пат. 2339280 Рос. Федерация № 2007118869/13; заяв. 21.05.07; опубл. 27.11.08, Бюл. № 33.
15. Невзоров В.Н., Куриленко Н.И. Устройство для разрушения скорлупы кедровых орехов: пат. 2350231 Рос. Федерация № 2008102306/13; заяв. 21.01.08; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9.
16. Невзоров В.Н., Холопов В.Н., Самойлов В.А., Голубев И.В. Устройство для разрушения скорлупы ореха: пат. 128462 Рос. Федерация № 2012150256/13; заяв. 23.11.12; опубл. 27.05.013, Бюл. № 15.
17. Бырдин В.Н. Холопов В.Н., Невзоров В.Н. Модернизация технологического оборудования для заготовки и транспортировки недревесного растительного сырья // *АПК России*. 2015. № 74. С. 118-123.
18. Куриленко Н.И. Исследование физико-механических свойств кедрового ореха // *Вестн. Крас. гос. аг. ун-та*. 2010. № 2. С. 149-153.
19. Бырдин П.В., Медведева О.И., Михальский Д.В. Теоретические аспекты шелушения термообработанных кедровых шишек // *Вестн. КрасГАУ*. 2013. № 6. С. 207-212.
20. Бырдин П.В., Михальский Д.В. Теоретические исследования устройства для извлечения ореха из кедровой шишки // *Вестн. КрасГАУ*. 2010. № 6. С. 139-143.
1. Bekh I.A. Prospects for the development of pine nuts in the forests of Siberia // *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2008. T. 1, № 4. P. 414-421.
2. Lin S., Xue P., Zhang S., Dong X., Liang R., Liu Z. Antioxidant activity improvement of identified pine nut peptides by pulsed electric field (pef) and the mechanism exploration // *LWT - Food Science and Technology*. 2017. Vol. 75. P. 366-372.
3. Zhao T., Hong S.I., Yoon S.W., Kim I.-H., Kim B.H., Kim C.-T., Kim Y. Lipase-catalyzed production of pinolenic acid concentrate from pine nut oil using a recirculating packed bed reactor // *Jour. of Food Science*. 2012. Vol. 77, № 2. P. 267-271.
4. Lee B.-M., Choi J.-H., Hong S.I., Yoon S.W., Kim I.-H., Kim B.H., Kim C.-T., Kim C.-J., Kim Y. Enrichment of pinolenic acid from pine nut oil via lipase-catalyzed ethanolysis with an immobilized candida antarctica lipase // *Biocatalysis and Bio-transformation*. 2011. Vol. 29, № 4. P. 155-160.
5. Ballin N.Z., Mikkelsen K. Polymerase chain reaction and chemometrics detected several pinus species including pinus armandii involved in pine nut syndrome // *Food Control*. 2016. Vol. 64. P. 234-239.
6. Xie K., Miles E.A., Calder P.C. A review of the potential health benefits of pine nut oil and its characteristic fatty acid pinolenic acid // *Jour. of Functional Foods*. 2016. Vol. 23. P. 464-473.
7. Mazalievskii V.B., Nitsievskaya K.N., Motovilov O.K. Methodical approaches to creating products from the core of pine nuts // *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2015. № 6 (247). P. 76-81.
8. Egorova E.Yu., Batashova N.V., Bochkarev M.S. Biological value and functional-technological properties of cedar core oil cake // *Fat and oil processing industry*. 2007. № 6. P. 41-44.
9. Buzetti K.D., Umarova Z.M., Lyusiyun' D.L., Gryzenkov A.V. Preparation of alcoholic infusion from pine nuts in an accelerated manner in recirculating // *Tekhnologii 21 veka v pishchevoi, pererabatyvayushchei i legkoi promyshlennosti*. 2012. № 6-1. P. 2.
10. Mikkelsen A.T., Jessen F., Ballin N.Z. Species determination of pine nuts in commercial samples causing pine nut syndrome // *Food Control*. 2014. Vol. 40, № 1. P. 19-25.
11. Egorova E.Yu., Budaeva V.V., Lobanova A.A., Ilyasov S.G. Pine nut shells in the production of alcoholic and nonalcoholic beverages // *Beer and beverages*. 2005. № 5. P. 44-46.
12. Byrdin P.V., Mikhail'skii D.V., Boreikina E.M. A device for peeling pine cones with their pre-heat treatment: pat. 2491010 Ros. Federatsiya № 201147697/13; заяв. 23.11.11; опубл. 27.08.13, Byul. № 24.
13. Nevzorov V.N., Korneev S.V. A device for extracting the nuclei of cedar nuts: pat. 2332913 Ros. Federatsiya № 2006145690/13; заяв. 21.12.06; опубл. 10.09.08, Byul. № 25.
14. Nevzorov V.N., Kurilenko N.I., Golubev I.V. The device for breaking the shell of pine nuts: pat. 2339280 Ros. Federatsiya № 2007118869/13; заяв. 21.05.07; опубл. 27.11.08, Byul. № 33.
15. Nevzorov V.N., Kurilenko N.I. The device for breaking the shell of pine nuts: pat. 2350231 Ros. Federatsiya № 2008102306/13; заяв. 21.01.08; опубл. 27.03.09, Byul. № 9.
16. Nevzorov V.N., Kholopov V.N., Samoilov V.A., Golubev I.V. The device for breaking a nut shell: pat. 128462 Ros. Federatsiya № 2012150256/13; заяв. 23.11.12; опубл. 27.05.013, Byul. № 15.
17. Byrdin V.N., Kholopov V.N., Nevzorov V.N. Modernization of technological equipment for harvesting and transportation of non-wood plant raw material // *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2015. № 74. P. 118-123.
18. Kurilenko N.I. Investigation of the physical and mechanical properties of pine nuts // *The Bulletin of KrasGAU*. 2010. № 2. P. 149-153.
19. Byrdin P.V., Medvedeva O.I., Mikhail'skii D.V. Theoretical aspects of the peeling of heat-treated pine cones // *The Bulletin of KrasGAU*. 2013. № 6. P. 207-212.
20. Byrdin P.V., Mikhail'skii D.V. Theoretical studies of the device for extracting walnut cedar cones // *The Bulletin of KrasGAU*. 2010. № 6. P. 139-143.

## Оптимизация продуктивности дубовых насаждений

А.В. Середюк<sup>а</sup>, Н.В. Выводцев<sup>б</sup>

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская 136, Хабаровск, Россия

<sup>а</sup>seredyukalex@mail.ru, <sup>б</sup>004193@pnu.edu.ru

Статья поступила 2.10.2017, принята 16.10.2017

*Анализируется рост насаждений дуба черешчатого, скального и монгольского с целью построения оптимальных таблиц хода роста. Для древостоев разных уровней продуктивности определено поле варьирования численности стволов в границах классов возраста. В установленном диапазоне варьирования в пределах классов возраста дана регрессионная оценка влияния густоты дубовых древостоев на средние таксационные показатели — высоту, диаметр, видовое число, которая передается параболой 2-го порядка. В интервале 40–160 лет установлена связь между возрастом древостоев и параметрами регрессионного уравнения, описывающего зависимость таксационных показателей от густоты. На основе этих регрессий составлены обобщенные уравнения связи с двумя входами — возрастом и густотой. Приведен пример оптимальной таблицы хода роста дубовых насаждений, построенной с целью определения максимального среднего прироста крупной и средней древесины. По расчетам, оптимальный возраст технической спелости наступает в 150 лет. Достижение локального оптимума осуществляется постепенными уходами за численностью стволов.*

**Ключевые слова:** дуб монгольский; дуб черешчатый; дуб скальный; критерий оптимума; оптимальные насаждения; таблицы хода роста; густота насаждений; техническая спелость.

## Optimization of the productivity of oak planting

A. V. Seredyuk<sup>a</sup>, N. V. Vyvodtsev<sup>b</sup>

Pacific National University; 136, Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, Russia

<sup>a</sup>seredyukalex@mail.ru, <sup>b</sup>004193@pnu.edu.ru

Received 2.10.2017, accepted 16.10.2017

*The planting growth of Mongolian, English and durmast oaks for the purpose of making optimal growth tables is analyzed. For the stands of different levels of productivity, the field of variation in the number of trees within the boundaries of the age classes has been determined. In the established range of variation within the age classes, a regression estimate of the influence of the density of oak stands on the average taxonomic indicators is given: altitude, diameter, and species number. It is close and transmitted by a second-order parabola. In the interval of 40-160 years, a relationship is established between the age of the stands and the parameters of the regression equation describing the relationship between taxation indicators and density. These regressions compose generalized equations of connection with two inputs-age and density. The example of an optimal growth progress chart is given. It is constructed to determine the maximum average increment of large and medium wood in oak planting. According to calculations, the optimal age of technical ripeness comes in 150 years. Achievement of the local optimum is carried out by gradual grooming of the number of trunks.*

**Keywords:** Mongolian oak; English oak; durmast oak; optimal criterion; optimal plantations; growth progress tables; density of plantings; technical ripeness.

### Введение

Изучению дубрав посвящено множество научных работ, в том числе исследования В.А. Бугаева, А.П. Добрынина, Н.П. Калиниченко, Н.В. Выводцева и А.В. Середюк [1–5]. Большинство из них касаются роста, строения, продуктивности и сохранности дубовых насаждений. На территории России семейство буковых представлено тремя видами дуба: черешчатым, скальным и монгольским. Дубовые насаждения занимают 1,1 % от всей покрытой лесом территории страны и располагаются в европейской части России и на Дальнем Востоке (см. рис. 1). По данным государственного лесного реестра за 2013 г. [6], площадь насаждений дуба монгольского в целом (дуб высокоствольный и низкоствольный) составляет около 3 203,3 тыс. га, за-

пасы — свыше 316,9 млн м<sup>3</sup>. На один га в среднем приходится около 100 м<sup>3</sup>. Образовались дубы в результате выборочных рубок в насаждениях сосны кедровой корейской и пожаров [7]. По сравнению с нормальными древостоями А.П. Добрынина, дубы относятся к низкополнотным и требуют проведения реконструктивных лесохозяйственных мероприятий. Наиболее полно отвечать целям реконструкции, по-видимому, будут насаждения, имеющие оптимальную структуру состава и численность стволов. Методика построения таких нормативов обусловлена выбором критерия оптимизации. Для высокопродуктивных насаждений дуба таким критерием является достижение в кратчайшие сроки максимума среднего прироста крупной и средней деловой древесины или возраста технической спелости. Экспе-



риментальным материалом чаще всего являются пробные площади или таксационные выделы. Использование для этой цели таблиц хода роста определенной породы, но разных видов, разного происхождения, разных географических районов — новый подход к разработке оптимальных нормативов для оценки продуктивности насаждений.

*Целью исследования* является построение регрессионных моделей, а на их основе — оптимальных таблиц хода роста дубовых насаждений.

*Объекты и методика.* Объектом исследования являлись дубовые насаждения, произрастающие на территории европейской части страны и на Дальнем Востоке (Приморский край). Экспериментальным материалом послужили таблицы хода роста дубовых насаждений порослевого и семенного происхождения для европейской части России, помещенные в общесоюзном справочнике нормативов для таксации лесов [8], а также таблицы хода роста по дубу монгольскому, произрастающему на территории Дальнего Востока. Анализ хода роста таксационных показателей выполнен с помощью метода индексов. Этот метод апробирован при изучении общих закономерностей роста сосновых, еловых, лиственничных, осиновых и березовых насаждений. На его основе построен ряд общих нормативов: таблицы хода роста нормальных насаждений, стан-

дартные таблицы сумм площадей сечений и запасов, таблицы видовых высот. Входом в эти таблицы являются класс бонитета и возраст, чего недостаточно для целей оптимизации. Авторами статьи разработана таблица хода роста оптимальных насаждений, в которой в качестве независимых переменных рассматриваются возраст и густота. Для расчета динамики товарных характеристик дубовых насаждений привлекали товарные таблицы, помещенные в справочнике таксатора для лесов Дальнего Востока [9].

**Результаты и обсуждение.** С лесоводственной точки зрения каждое насаждение должно выполнять определенную цель. В промышленных лесах при выборе целевого ориентира в качестве критерия оптимизации принимают техническую спелость насаждения, или количество выращенной к определенному возрасту товарной древесины. Естественно, достижение этого оптимума должно быть отражено в таблицах хода роста. Таблицы хода роста нормальных насаждений для этой цели не подходят. Они характеризуют рост наиболее полных насаждений и в этой связи являются своеобразным эталоном. При их составлении используются парные регрессионные уравнения связи таксационных показателей с возрастом.

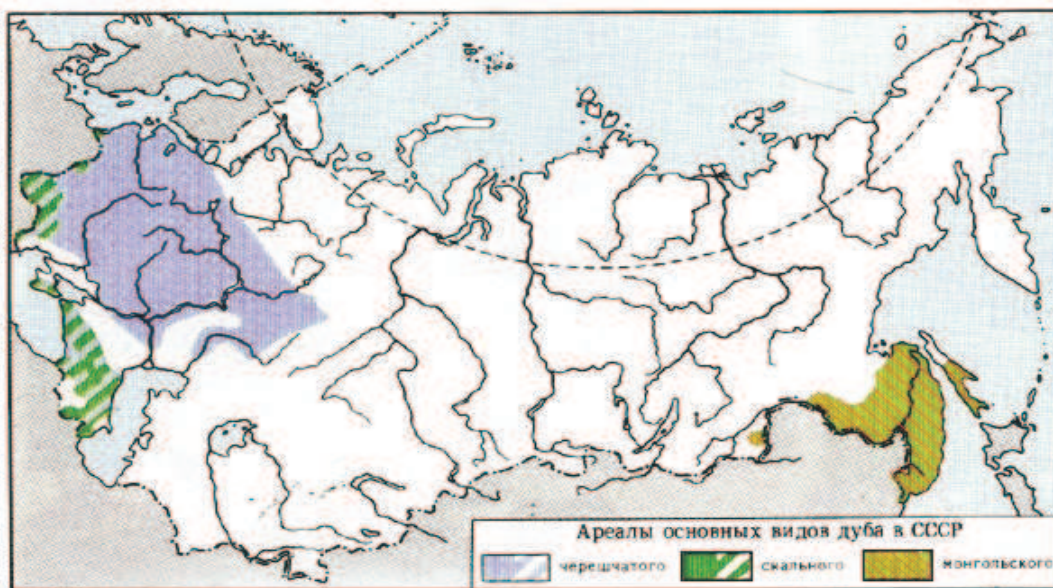


Рис. 1. Ареалы распространения дуба на территории России

Не подходят для этой цели и таблицы хода роста модельных насаждений, которые отражают рост средних, наиболее распространенных древостоев. Достижение определенной цели хозяйства решается с помощью оптимальных таблиц хода роста, где независимой переменной, кроме возраста, является число стволов. Зависимые переменные (высота, диаметр) в большинстве случаев находятся в тесной связи с этими показателями. Варьируя количество стволов в насаждении, можно оказывать влияние на величину запаса древостоя.

В относительных величинах таксационные показатели дубовых насаждений, независимо от происхождения, практически не влияют на характер их изменения с

возрастом, т. е. они имеют близкие значения индексов в определенном возрастном интервале. Происхождение древостоев также не оказывает влияния на изменчивость индексов роста. Семенные и порослевые насаждения дуба по всем показателям укладываются в узкий пучок линий. Отсутствие различий в характере роста и обусловило разработку единой таблицы хода роста для дубовых насаждений, входом в которую являются возраст и число стволов. Методическое решение этой задачи состояло из нескольких этапов.

*На первом этапе* по таблицам хода роста анализировалась численность стволов в определенных возрастах. С этой целью из таблиц хода роста по оси ординат





откладывали количество стволов, а по оси абсцисс — возраст. В результате был определен диапазон варьирования численности стволов по всему возрастному интервалу, отраженному в таблицах хода роста у трех видов дуба. Своеобразное поле возрастного изменения численности стволов в дубовых насаждениях показано на рис. 2. Верхнюю ( $N_{верх}$ ) и нижнюю ( $N_{ниж}$ ) границы варьирования ограничили кривыми, которые описаны

параболами 3-го порядка с высоким ( $R^2 = 0.94$ ) коэффициентом детерминации:

$$N_{верх} = 1.7897 \times 10^2 - 1.0325 \times 10^{-1} \times A + 2.7601 \times 10^{-5} \times A^2 - 2.3809 \times 10^{-9} \times A^3, \quad (1)$$

$$N_{ниж} = 3.87 \times 10^2 - 1.36 \times A + 1.86 \times 10^{-3} \times A^2 - 8.50 \times 10^{-7} \times A^3, \quad (2)$$

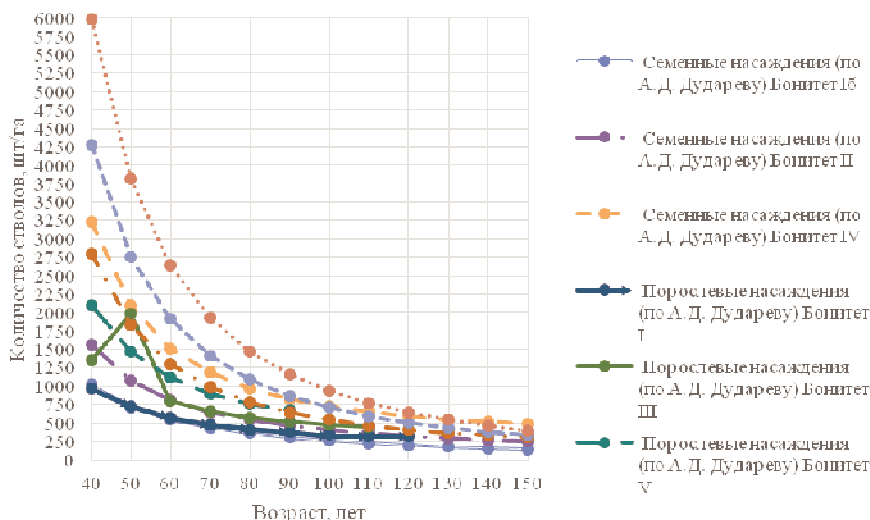


Рис. 2. Зависимость количества стволов от возраста по таблицам хода роста А.Д. Дударева и А.П. Добрынина

На втором этапе в границах установленного поля изреживания дубовых насаждений по каждому классу возраста изучена зависимость средних значений объемобразующих показателей высоты, диаметра, видового числа от густоты древостоев. С высоким коэффициентом корреляции у всех трех показателей установленная закономерность передается параболой 2-го порядка.

$$\begin{aligned} H_{40} &= a + bN_{40} + cN_{40}^2; H_{50} = a + bN_{50} + cN_{50}^2; \\ H_{60} &= a + bN_{60} + cN_{60}^2; \dots H_{160} = a + bN_{160} + cN_{160}^2; \end{aligned} \quad (3)$$

$$D_{40} = a + bN_{40} + cN_{40}^2; D_{50} = a + bN_{50} + cN_{50}^2; \quad (4)$$

$$D_{60} = a + bN_{60} + cN_{60}^2; \dots D_{160} = a + bN_{160} + cN_{160}^2; \quad (5)$$

$$F_{40} = a + bN_{40} + cN_{40}^2; F_{50} = a + bN_{50} + cN_{50}^2; \quad (5)$$

$$F_{60} = a + bN_{60} + cN_{60}^2; \dots F_{160} = a + bN_{160} + cN_{160}^2; \quad (5)$$

где H, D, F — соответственно значения высоты, диаметра, видового числа в возрасте; N — число стволов в возрасте, шт./га.

Коэффициенты регрессии уравнений (3) – (5) представлены в табл. 1–3.

Таблица 1

Изменение коэффициентов квадратичного уравнения, описывающего зависимость высоты от количества стволов в границах определенного возраста

Возраст (A)	a	b	c
40	25.739	$-8.387 \times 10^{-3}$	$8.75575 \times 10^{-7}$
50	30.037	$-1.334 \times 10^{-2}$	$2.00923 \times 10^{-6}$
60	37.635	$-2.723 \times 10^{-2}$	$6.42788 \times 10^{-6}$
70	43.087	$-4.179 \times 10^{-2}$	$1.33229 \times 10^{-5}$
80	48.310	$-6.008 \times 10^{-2}$	$2.47065 \times 10^{-5}$
90	53.353	$-8.175 \times 10^{-2}$	$4.16523 \times 10^{-5}$
100	55.148	$-9.518 \times 10^{-2}$	$5.63268 \times 10^{-5}$
110	56.074	$-1.055 \times 10^{-1}$	$6.95667 \times 10^{-5}$
120	57.128	$-1.172 \times 10^{-1}$	$8.47385 \times 10^{-5}$
130	61.766	$-1.565 \times 10^{-1}$	$1.40067 \times 10^{-4}$
140	64.463	$-1.861 \times 10^{-1}$	$1.88775 \times 10^{-4}$
150	66.237	$-2.119 \times 10^{-1}$	$2.36967 \times 10^{-4}$
160	63.772	$-2.069 \times 10^{-1}$	$2.43234 \times 10^{-4}$



Таблица 2

Изменение коэффициентов квадратичного уравнения, описывающего зависимость средних диаметров от количества стволов в границах определенного возраста

Возраст (А)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
40	26,043	$-8,319 \times 10^{-3}$	$8,63136 \times 10^{-7}$
50	30,951	$-1,260 \times 10^{-2}$	$1,80527 \times 10^{-6}$
60	40,970	$-2,773 \times 10^{-2}$	$6,28409 \times 10^{-6}$
70	48,551	$-4,356 \times 10^{-2}$	$1,31692 \times 10^{-5}$
80	56,124	$-6,382 \times 10^{-2}$	$2,47851 \times 10^{-5}$
90	63,816	$-8,914 \times 10^{-2}$	$4,28336 \times 10^{-5}$
100	70,855	$-1,170 \times 10^{-1}$	$6,70945 \times 10^{-5}$
110	77,704	$-1,484 \times 10^{-1}$	$9,90570 \times 10^{-5}$
120	84,329	$-1,828 \times 10^{-1}$	$1,38661 \times 10^{-4}$
130	89,759	$-2,141 \times 10^{-1}$	$1,77851 \times 10^{-4}$
140	76,799	$-1,488 \times 10^{-1}$	$9,75424 \times 10^{-5}$
150	100,474	$-2,872 \times 10^{-1}$	$2,83301 \times 10^{-4}$
160	110,767	$-3,945 \times 10^{-1}$	$4,70211 \times 10^{-4}$

Таблица 3

Изменение коэффициентов квадратичного уравнения, описывающего зависимость видового числа от количества стволов в границах определенного возраста

Возраст (А)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
40	$4,509 \times 10^{-1}$	$4,903 \times 10^{-5}$	$-2,05662 \times 10^{-9}$
50	$4,683 \times 10^{-1}$	$3,260 \times 10^{-5}$	$3,57641 \times 10^{-9}$
60	$4,312 \times 10^{-1}$	$9,185 \times 10^{-5}$	$-8,34328 \times 10^{-9}$
70	$4,236 \times 10^{-1}$	$1,187 \times 10^{-4}$	$-1,75755 \times 10^{-8}$
80	$4,212 \times 10^{-1}$	$1,419 \times 10^{-4}$	$-3,29146 \times 10^{-8}$
90	$4,151 \times 10^{-1}$	$1,790 \times 10^{-4}$	$-6,81317 \times 10^{-8}$
100	$4,142 \times 10^{-1}$	$2,077 \times 10^{-4}$	$-1,17279 \times 10^{-7}$
110	$4,131 \times 10^{-1}$	$2,441 \times 10^{-4}$	$-1,96276 \times 10^{-7}$
120	$4,251 \times 10^{-1}$	$2,109 \times 10^{-4}$	$-2,17980 \times 10^{-7}$
130	$4,715 \times 10^{-1}$	$-5,896 \times 10^{-5}$	$8,26835 \times 10^{-7}$
140	$4,715 \times 10^{-1}$	$-5,896 \times 10^{-5}$	$8,26835 \times 10^{-8}$
150	$6,136 \times 10^{-1}$	$-1,219 \times 10^{-3}$	$1,94199 \times 10^{-6}$
160	$3,622 \times 10^{-1}$	$7,055 \times 10^{-4}$	$-7,95965 \times 10^{-7}$

На третьем этапе выполнен графико-аналитический анализ параметров уравнений (3) – (5), описывающих связь высоты, диаметра и видового числа от числа стволов в пределах определенного возраста. Результаты регрессионного анализа свидетельствуют, что изменения параметров (*a*, *b*, *c*) с возрастом подчиняются определенной закономерности, которую с высокой степенью приближения ( $R^2 = 0,98$ ) можно выразить параболой 2-го порядка (рис. 3–5), что выражено в уравнениях (6) – (8):

$$y(a) = 2.701 \times 10^{-3} \times A^2 + 8.66 \times 10^{-1} \times A - 4.828, \quad (6)$$

$$y(b) = 5.4545 \times 10^{-6} \times A^2 - 7.2667 \times 10^{-4} \times A + 3.93 \times 10^{-2}, \quad (7)$$

$$y(c) = 2.1446 \times 10^{-8} \times A^2 - 2.1539 \times 10^{-6} \times A + 5.618 \times 10^{-5}, \quad (8)$$





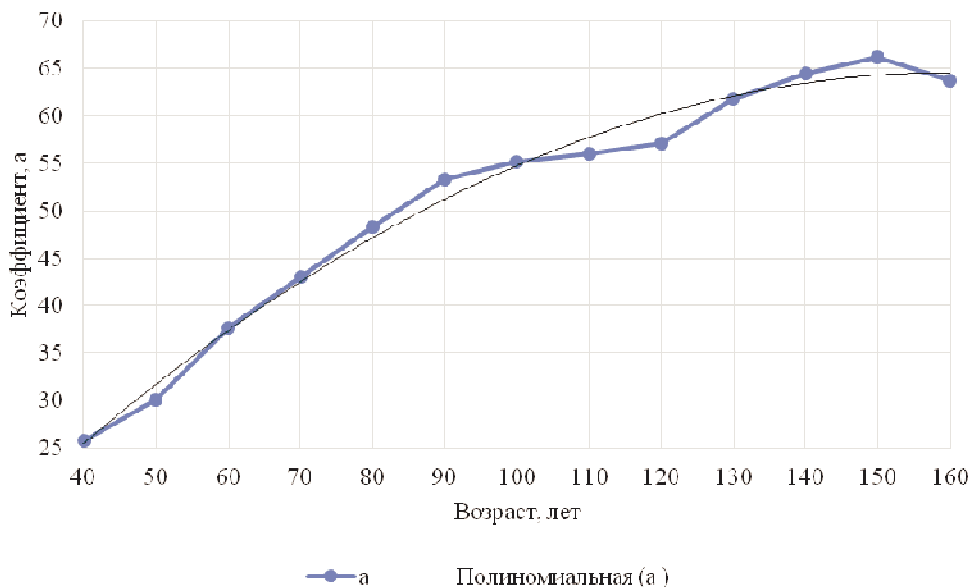


Рис. 3. Зависимость коэффициента (а) от возраста по высоте

После замены в формуле (3) значений параметров а, в, с на конкретные уравнения регрессии было составлено обобщенное уравнение, позволяющее рассчитать высоту в интервале 40–160 лет для трех групп густоты:

$$\begin{aligned}
 H_i = & (-2.701 \times 10^{-3} \times A^2 + 8.66 \times 10^{-1} \times \\
 & A - 4.828) + (-5.4545 \times 10^{-6} \times A^2 - \\
 & 7.2667 \times 10^{-4} \times A + 3.393 \times 10^{-2}) \times N_i + \\
 & (2.1446 \times 10^{-8} \times A^2 - 2.1539 \times 10^{-6} \times A + \\
 & 5.618 \times 10^{-5}) \times N_i^2
 \end{aligned} \quad (9)$$

Тесная связь параметров уравнений (4) и (5), описывающих зависимость диаметров, видовых чисел от

густоты насаждений в границах определенного класса возраста (табл. 2, 3), с возрастом также описывается полиномиальным уравнением 2-го порядка. Подстановкой найденных регрессий в уравнения (4), (5) получены обобщенные математические модели по диаметру и видовому числу:

$$\begin{aligned}
 D_i = & (-1.1863 \times 10^{-3} \times A^2 + 8.9226 \times 10^{-1} \times \\
 & A - 8.2407) + (2.0210 \times 10^{-5} \times A^2 + \\
 & 1.3025 \times 10^{-3} \times A - 3.355 \times 10^{-2}) \times N_i + \\
 & (4.1565 \times 10^{-8} \times A^2 - 5.3653 \times 10^{-6} \times A + \\
 & 1.7219 \times 10^{-4}) \times N_i^2
 \end{aligned} \quad (10)$$

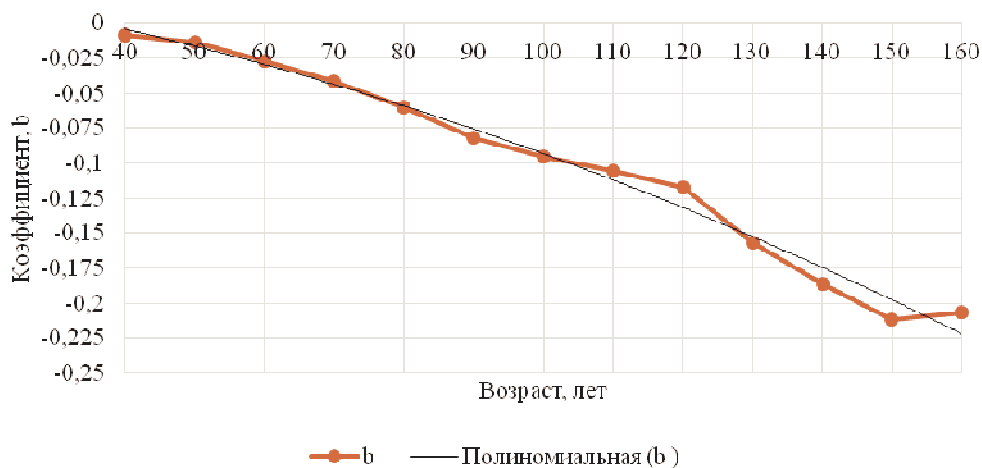


Рис. 4. Зависимость коэффициента (b) от возраста по высоте

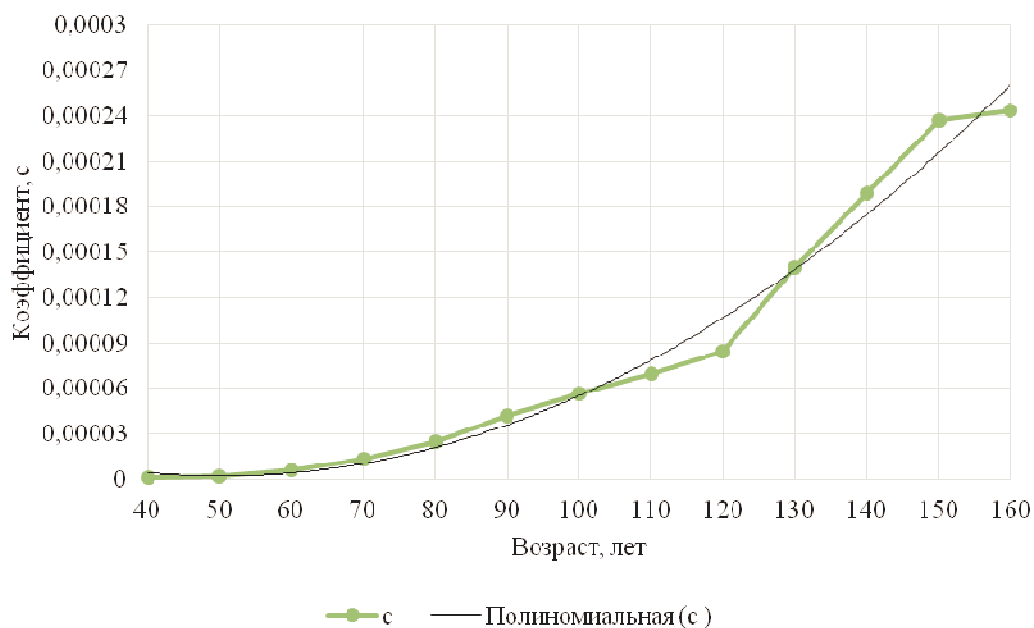


Рис. 5. Зависимость коэффициента (с) от возраста по высоте

$$F_i = (1.0442 \times 10^{-5} \times A^2 - 1.8110 \times 10^{-3} \times A + 5.0678 \times 10^{-1}) + (4.3056 \times 10^{-8} \times A^2 + 6.8242 \times 10^{-6} \times A - 1.4201 \times 10^{-4}) \times N_i + (5.6224 \times 10^{-11} \times A^2 - 8.4452 \times 10^{-9} \times A + 2.5391 \times 10^{-7}) \times N_i^2 \quad (11)$$

На четвертом этапе с помощью составленных уравнений регрессии (9) – (11) для каждого класса возраста и заданной густоты рассчитывались средние значения высоты, диаметра и видового числа. Суммы

площадей сечений, запас, средний прирост находили по общеизвестным в лесной таксации формулам [10]. Средний прирост крупной, средней и мелкой древесины определен по товарным таблицам. В итоге была составлена таблица хода роста дубовых насаждений для трех групп густоты, на основе которой определен оптимальный возраст технической спелости (табл. 4). В разработанной таблице хода роста она наступает в 150 лет. Максимальный средний прирост крупной и средней древесины в этом возрасте обеспечили 145 деловых стволов дуба.

Таблица 4

Ход роста дубовых насаждений

Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Видовое число, $10^{-3}$	Число стволов, шт.	Сумма площадей сечений, $m^2$	Запас, $m^3$	Запас древесины по категориям крупности, $m^3$				Средний прирост, $m^3$		
							крупная	средняя	крупная + средняя	мелкая	крупная + средняя	крупная	средняя
80	13,8	15,1	491	783	14,0	95,2	0,0	14,3	14,3	13,3	0,2	0,0	0,2
	23,0	28,7	477	496	32,0	351,2	49,2	49,2	98,3	7,0	1,2	0,6	0,6
	28,7	35,6	467	359	35,8	479,0	105,4	33,5	138,9	4,8	1,7	1,3	0,4
90	16,5	20,2	489	677	21,7	175,2	5,3	31,5	36,8	14,0	0,4	0,1	0,4
	23,9	31,0	475	463	34,9	396,3	71,3	43,6	114,9	4,0	1,3	0,8	0,5
	31,6	40,5	461	304	39,2	570,5	142,6	28,5	171,2	0,0	1,9	1,6	0,3
100	16,2	19,7	495	726	22,0	176,0	5,3	31,7	37,0	14,1	0,4	0,1	0,3
	22,9	30,6	476	475	35,0	381,7	68,7	42,0	110,7	3,8	1,1	0,7	0,4
	34,2	45,1	457	261	41,7	651,2	175,8	26,0	201,9	0,0	2,0	1,8	0,3
110	18,1	22,1	504	764	29,4	268,8	21,5	48,4	69,9	10,8	0,6	0,2	0,4
	22,7	31,2	476	466	35,6	383,6	69,0	42,2	111,2	3,8	1,0	0,6	0,4
	36,4	49,3	454	227	43,4	716,2	237,1	0,0	237,1	0,0	2,2	2,2	0,0
120	19,5	26,0	497	638	34,0	328,5	59,1	36,1	95,3	3,3	0,8	0,5	0,3
	25,6	36,3	468	377	39,1	469,0	117,2	23,4	140,7	0,0	1,2	1,0	0,2
	38,4	53,2	453	200	44,4	772,3	208,5	30,9	239,4	0,0	2,0	1,7	0,3

Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Видовое число, 10 <sup>-3</sup>	Число стволов, шт.	Сумма площадей сечений, м <sup>2</sup>	Запас, м <sup>3</sup>	Запас древесины по категориям крупности, м <sup>3</sup>				Средний прирост, м <sup>3</sup>		
							крупная	средняя	крупная + средняя	мелкая	крупная + средняя	крупная	средняя
130	20,0	28,1	493	550	34,1	337,3	74,2	23,6	97,8	3,4	0,8	0,6	0,2
	24,8	36,1	470	366	37,5	436,6	96,0	30,6	126,6	4,4	1,0	0,7	0,2
	39,3	56,7	458	178	44,9	808,5	334,1	0,0	334,1	0,0	2,6	2,6	0,0
140	19,9	28,6	489	517	33,1	322,7	58,1	35,5	93,6	3,2	0,7	0,4	0,3
	24,9	37,5	467	330	36,4	422,6	93,0	29,6	122,6	4,2	0,9	0,7	0,2
	40,0	59,9	457	160	45,1	823,5	374,1	0,0	374,1	0,0	2,7	2,7	0,0
150	19,2	28,1	488	492	30,4	284,4	51,2	31,3	82,5	2,8	0,5	0,3	0,2
	24,2	38,1	467	302	34,3	388,4	85,4	27,2	112,6	3,9	0,8	0,6	0,2
	40,2	62,8	463	145	44,9	834,5	413,4	0,0	413,4	0,0	2,8	2,8	0,0
160	17,9	26,7	489	472	26,3	230,0	32,2	32,2	64,4	4,6	0,4	0,2	0,2
	27,2	45,2	467	231	37,0	470,7	103,6	33,0	136,5	4,7	0,9	0,6	0,2
	39,8	65,5	470	132	44,5	832,7	412,5	0,0	412,5	0,0	2,6	2,6	0,0

### Заключение

Таким образом, проведенные исследования хода роста дубовых насаждений показали, что географический район не оказывает существенного влияния на характер изменения с возрастом основных таксационных показателей. При определенном соотношении численности стволов в природном фитоценозе могут быть созданы условия, дающие высокий лесорастительный эффект, выражающийся в максимальном приросте группы крупных и средних сортиментов в заранее заданных границах изреживания. При прочих равных условиях (одинаковый возраст) порослевые насаждения имеют меньшее количество стволов на гектаре по сравнению с семенными. Верхняя граница численности стволов установлена по данным семенных древостоев, нижняя — порослевых. В каждом возрастном интервале, в зависимости от количества стволов, имеются свои локальные оптимумы. Их можно использовать, как своеобразные ориентиры при достижении главной цели — максимального среднего прироста крупной и средней древесины. Поэтому основное внимание при проведении уходов следует сосредоточить на постепенном изреживании древостоя до 145 деловых стволов на один гектар.

### Литература

1. Бугаев В.А., Мусиевский А.Л., Царалунга В.В. Дубравы европейской части России // Лесной журнал. 2004. № 2. С. 7-13.
2. Добрынин А.П. Дубовые леса российского Дальнего Востока (биология, география, происхождения). Владивосток: Дальнаука, 2000. 260 с.
3. Калининченко Н.П. Руководство по ведению хозяйства и восстановлению дубрав в равнинных лесах европейской части Российской Федерации. М.: ВНИИЛМ, 2000. 136 с.
4. Середюк А.В., Выводцев Н.В. Составление стандартных нормативов для таксации дубовых насаждений // Системы Методы Технологии. 2017 № 2 (34) С. 157-164.

5. Выводцев Н.В., Середюк А.В. Составление стандартных нормативов для таксации дубовых насаждений [Электронные заметки] // Учен. заметки ТОГУ. 2017. Т. 8, № 1. С. 29-35. URL: <http://pnu.edu.ru/ejournal/pub/articles/1487/> (дата обращения: 12.08.2017).

6. Лесной реестр 2013: стат. сб. / сост. Р.Ю. Голунов, А.В. Станин, О.В. Гагарина, В.А. Шевалева, Д.В. Фомченков, С.В. Шалыгин, С.В. Данилова, Н.К. Данилов, Л.С. Телешов, Г.В. Кудрина, Е.В. Щанкина, А.С. Перезовова. М., 2014. 690 с.

7. Выводцев Н.В., Выводцева А.Н., Ресукэ Кобояси Сосна кедровая корейская в Хабаровском крае и перспективы ее восстановления. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. 206 с.

8. Общесоюзные нормативы для таксации лесов [Электронный ресурс], утв. Приказом Госкомлеса СССР от 28.02.1989 N 38 // Библиотека нормативно-правовых актов СССР: сайт. URL: [www/libussr.ru](http://www.libussr.ru) (дата обращения: 23.05.2017).

9. Справочник для таксации лесов Дальнего Востока / сост. В.Н. Корякин. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1990. 512 с.

10. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. промыш-ленность, 1971. 512 с.

11. Васильев В.Н. Происхождения дальневосточных дубрав // Учен. зап. Ленингр. пед. ин-та им. Герцена. Л., 1948. Т. 73. С. 139-157.

12. Добрынин А.П. Дубовые леса российского Дальнего Востока (биология, география, происхождения). Владивосток: Дальнаука, 2000. 260 с.

13. Калининченко Н.П. Дубравы России. М.: ВНИИЦ лес-ресурс, 2000. 531 с.

14. Ерусалимский В.И. Как сохранить дубравы? // Лесн. хозяйство. 2000. № 5. С. 13-15.

15. Лесной реестр 2013: стат. сб. / сост. Р.Ю. Голунов, А.В. Станин, О.В. Гагарина, В.А. Шевалева, Д.В. Фомченков, С.В. Шалыгин, С.В. Данилова, Н.К. Данилов, Л.С. Телешов, Г.В. Кудрина, Е.В. Щанкина, А.С. Перезовова. М., 2014. 690 с.

16. Лосицкий К.Б. Продуктивность, воспроизводство и жизнестойкость дубовых лесов по зонам СССР // Дубравы и повышение их продуктивности // Сб. тр. ВНИИЛМ. М., 1981. С. 13-36.



17. Загребев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалева А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.

18. Положенцев П.А., Савин И.М. О причинах отмирания дубрав // Лесн. хозяйство. 1976. № 5. С. 93-95.

19. Калининченко Н.П. Руководство по ведению хозяйства и восстановлению дубрав в равнинных лесах европейской части Российской Федерации. М.: ВНИИЛМ, 2000. 136 с.

20. Шаталов В.Г. Руководство по улучшению состояния и повышению продуктивности дубрав в лесосотепной зоне европейской части Российской Федерации. Воронеж: ВГУ, 1997. 68 с.

### References

1. Bugaev V.A., Musievskii A.L., Tsaralunga V.V. Oak groves of the European part of Russia // Forest Journal. 2004. № 2. P. 7-13.

2. Dobrynin A.P. Oak woods of the Russian Distant East (biology, geography, origins). Vladivostok: Dal'nauka, 2000. 260 p.

3. Kalinichenko N.P. The guide to housekeeping and restoration of oak groves in the flat woods of the European part of the Russian Federation. M.: VNIILM, 2000. 136 p.

4. Seredyuk A.V., Vyvodtsev N.V. Drawing up standard standards for valuation of oak plantings // Systems. Methods. Technologies. 2017 № 2 (34). P. 157-164.

5. Vyvodtsev N.V. Seredyuk A.V. Drawing up standard standards for valuation of oak plantings. The Online scientific magazine "Scientific Notes PNU" // Uchen. zametki TOGU. 2017. T. 8, № 1. P. 29-35. URL:<http://pnu.edu.ru/ejournal/pub/articles/1487/> (data obrashcheniya: 12.08.2017).

6. Forest register of 2013. Statistical collection / sost. R.Yu. Golunov, A.V. Stanin, O.V. Gagarina, V.A. Shevaleva, D.V. Fomchenkov, S.V. Shalygin, S.V. Danilova, N.K. Danilov, L.S. Teleshov, G.V. Kudrina, E.V. Shchankina, A.S. Perevozova. M., 2014. 690 p.

7. Vyvodtsev N.V., Vyvodtseva A.N., Resuke Koboyasi. Pine cedar Korean in Khabarovsk Krai and the prospects of her restoration. Khabarovsk: Izd-vo Tikhookean. gos. un-ta, 2016. 206 p.

8. All-union standards for valuation of the woods [Elektronnyi resurs], utv. Prikazom Goskomlesa SSSR ot 28.02.1989 N 38 // Biblioteka normativno-pravovykh aktov SSSR: sait. URL:[www/libussr.ru](http://www.libussr.ru) (data obrashcheniya: 23.05.2017).

9. The reference book for valuation of the woods of the Far East / sost. V.N. Koryakin. Khabarovsk: Dal'NIILKh, 1990. 512 p.

10. Anuchin N.P. Forest valuation. M.: Lesn. proyshlennst', 1971. 512 p.

11. Vasil'ev V.N. Origins of the Far East oak groves // Uchen. zap. Leningr. ped. in-ta im. Gertsena. L., 1948. T. 73. P. 139-157.

12. Dobrynin A.P. Oak woods of the Russian Far East (biology, geography, origins). Vladivostok: Dal'nauka, 2000. 260 p.

13. Kalinichenko N.P. Oak groves of Russia. M.: VNIITs lesresurs, 2000. 531 p.

14. Erusalimskii V.I. How to keep oak groves? // Lesn. khozyaistvo. 2000. № 5. P. 13-15.

15. Forest register of 2013. Statistical collection / sost. R.Yu. Golunov, A.V. Stanin, O.V. Gagarina, V.A. Shevaleva, D.V. Fomchenkov, S.V. Shalygin, S.V. Danilova, N.K. Danilov, L.S. Teleshov, G.V. Kudrina, E.V. Shchankina, A.S. Perevozova. M., 2014. 690 p.

16. Lositskii K.B. Efficiency, reproduction and resilience of the oak woods on zones of the USSR. Oak groves and increase in their efficiency // Sb. tr. VNIILM. M., 1981. P. 13-36.

17. Zagreev V.V., Sukhikh V.I., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkalev A.G. All-union standards for valuation of the woods. M.: Kolos, 1992. 495 p.

18. Polozhentsev P.A., Savin I.M. About the reasons of dying off of oak groves // Lesn. khozyaistvo. 1976. № 5. P. 93-95.

19. Kalinichenko N.P. The guide to housekeeping and restoration of oak groves in the flat woods of the European part of the Russian Federation. M.: VNIILM, 2000. 136 p.

20. Shatalov V.G. The guide to improvement of a state and increase in efficiency of oak groves in a lesosotepny zone of the European part of the Russian Federation. Voronezh: VGU, 1997. 68 p.

## Исследование положения кармашков в стволе дерева лиственницы даурской

А.Ю. Охлопкова

ООО «Азия Лес» пер. Облачный, 78а, 11, г. Хабаровск, Россия

anna.okhlopkova@gmail.com

Статья поступила 14.06.2017, принята 15.09.2017

*В статье описаны полевые исследования положения кармашков в стволе дерева лиственницы даурской, проведенные с целью сбора статистических данных, их анализа и получения математических зависимостей с морфологическими параметрами дерева для последующего использования в математическом моделировании при решении задач по оптимизации объемно-ценностного выхода продукции лесопильно-деревообрабатывающих предприятий. Приведено обоснование исследований и сбора данных о положении и размерах кармашков с точки зрения поиска оптимального раскроя бревна для получения пиломатериалов более высокого качества. В основу работы по изучению кармашков как порока строения древесины положен анализ соответствующих требований основных российских и международных стандартов качества хвойных пиломатериалов. В статье пошагово проиллюстрирован процесс сбора необходимых данных. Выявлена зависимость положения кармашков от качественных зон ствола, а также от основных морфологических параметров ствола дерева. Вычислены границы скопления кармашков по толщине и длине ствола дерева. В результате исследования выявлено одинаковое количество кармашков с северной и южной сторон сердцевинной вырезки. Более половины обнаруженных кармашков находились в зонах, включивших прочие пороки строения древесины. Наиболее явная зависимость выявлена в отношении зон присучковой древесины, границ перехода от ядровой к заболонной и от заболонной к лубяной древесине.*

**Ключевые слова:** древесина; ствол дерева; кармашки; даурская лиственница.

## Study of the position of pitch pockets in the tree trunk of the Dahurian larch

A. Yu. Okhlopkova

“Asia Les” Ltd; 78a, 11, Oblachny Per., Khabarovsk, Russia

anna.okhlopkova@gmail.com

Received 14.06.2017, accepted 15.09.2017

*The article deals with the study of the position of pitch pockets in Dahurian larch tree trunk. It describes field research on defect of wood structure with a view to collecting statistical data, its analysis and obtaining mathematical dependences with morphological parameters of the tree for subsequent use of data in mathematical modeling when solving the problems of optimization of output of lumber and wood products industry. The article substantiates the research on data collection on the position and size of pitch pockets in Dahurian larch tree trunk to find the optimal cutting of logs for obtaining sawn wood of higher quality. The author gives a consistent and detailed description of the research method. The analysis of the requirements for the defect of the main Russian and international quality standards for soft timber serves as the basis for this research. The process of necessary data collection is illustrated step by step in the article. The results of the research of pitch pockets in Dahurian larch tree trunk are analyzed in detail. The dependence of the pockets' position on qualitative zones of the trunk, as well as on the main morphological parameters of tree trunk, is determined. The boundaries of pockets accumulation along the thickness and length of the tree trunk are calculated. As a result of the research, the same number of the pockets from the northern and southern sides of the core cut has been identified. More than half of the found pockets were in the areas that included other defects of wood structure. The most pronounced dependency is revealed in the areas of inferior wood, the boundaries of the transition from sound to sapwood and from sapwood to bastwood.*

**Key words:** wood; tree trunk; pockets; Dahurian larch.

### Введение

В результате исследований, проведенных на базе лесопильного завода ООО «Алмас», расположенного в Якутске [1], было выявлено, что 13,1 % пиломатериалов

радиального раскроя, произведенных из комлевых бревен, и 14,7 % экспортной продукции смешенного раскроя, произведенной из древесины лиственницы даурской, отбраковываются из-за наличия такого порока, как кармаш-

ки. Снижение наличия данного порока в конечной продукции приведет к повышению выхода высококачественной продукции и, следовательно, росту экономической эффективности лесопильного производства.

Причины возникновения кармашков до сих пор не получили единого научного обоснования. Не существует достаточно точных математических моделей для описания параметров их расположения, хотя данным вопросам уделялось значительное внимание иностранных ученых. Среди прочих можно назвать работы, посвященные наблюдению кармашков у псевдотсуги Мензиса (ель Дугласа) [2], у сосны обыкновенной [3], сосны лучистой [4], у ели норвежской [5], а также использованию томографии для выявления кармашков [6]. В российской науке изучение лиственницы представлено в работах Н.А. Кадочникова, Э.И. Адамовича [7], А.Н. Шатерникова. Представляет интерес исследование В.Ф. Беденко о различном погашении радиоактивного излучения в зависимости от характеристики древесины. Впрочем, из перечисленных работ российских и советских ученых только Адамович приводит данные о положении кармашков, но без объяснения возможных причин их возникновения. В остальных работах изучаются смоляные ходы и смолотечение для получения живицы.

В качестве основных причин возникновения кармашков большинством иностранных авторов указываются три основные причины: ветровая нагрузка [8], засуха и внешнее повреждение. Большинство авторов отдают предпочтение предположению об избыточном напряжении от ветровой нагрузки [9]. Среди исследований отечественных ученых в области напряженно-деформированного состояния древесного ствола можно выделить работы [10, 11, 12, 13]. В одной из последних работ Глухих приведены вычисления основных напряжений в радиальном и тангенциальном направлениях [14]. В основу данной работы положена теория об уравновешенной системе ствола дерева как стержне переменного сечения с локальными зонами максимальных внутренних напряжений. В результате их циклического нагружения от ветровой нагрузки происходят микроповреждения волокон древесины, приводящие к образованию кармашков [15].

Таким образом, целесообразно проследить локализацию смоляных кармашков по радиусу сечения, а также по высоте ствола дерева.

Методика исследования. Согласно вышеизложенной гипотезе, наличие, положение и размерные характеристики пороков строения, а именно смоляных кармашков, в значительной степени определяются характеристиками ствола дерева и условиями произрастания (разветвленность кроны, ветровая нагрузка и нагрузка от осадков) при прочих равных генетических данных и условиях произрастания.

Для выявления данной зависимости было предпринято полевое исследование положения и размеров кармашков в стволе дерева лиственницы даурской, произ-

растающей в Якутии. Исследуемые параметры были соотнесены с розой ветров места заготовки образцов и данными о максимальных порывах ветра. Следует отметить, что максимальные порыва ветра наблюдаются в июле, в середине вегетативного периода. Место для заготовки было отведено Якутским лесничеством на 25-м км Вилюйского тракта. Образцы модельных деревьев были заготовлены на территории городского округа «Город Якутск» согласно ГОСТ 16483.6-80 «Древесина. Метод отбора модельных деревьев и кряжей для определения физико-механических свойств древесины насаждений».

На этапе отбора модельных деревьев определяются следующие параметры: класс роста; местонахождение корневой шейки; местонахождение сторон света (север, юг); диаметр на высоте груди (1,3 м).

У срубленных стволов рулеткой (ГОСТ 7503-98) были измерены: длина хлыста; расстояние от корневой шейки до первого мертвого сучка, до первого живого сучка и до места прикрепления кроны.

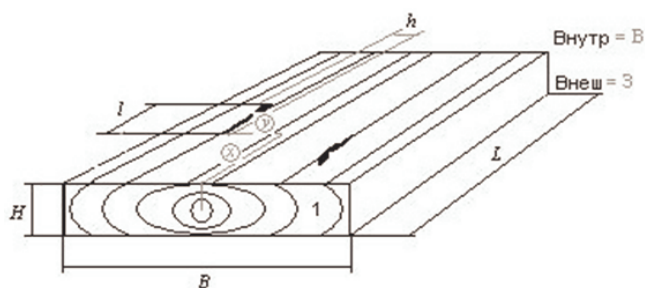
Все измеренные показатели были зафиксированы и занесены в протокол. После определения указанных параметров у модельных деревьев были обрублены все сучья и отделена вершинная часть неделовой древесины. Затем было отмечено направление сторон света на протяжении всей длины хлыста и произведены замеры диаметра в коре на расстоянии от корневой шейки  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  и  $\frac{3}{4}$  длины ствола.

Результаты измерений были занесены в протокол исследования, после чего произведены разметка, маркировка и разделение ствола на равные отрезки (2-метровые кряжи). Разделка модельных деревьев также осуществлялась согласно ГОСТ 16483.6-80. Была произведена фотосъемка торцов всех кряжей (108 шт.) для цифровой обработки данных. В качестве исследовательских образцов выступали сердцевинные вырезки «север – юг». Для проведения распиловки применялся станок российского производства «Кедр-4» с узкой ленточной пилой «Uddeholm».

Исследуемый порок, кармашек, относится к группе пороков строения древесины и является нормируемым. Кармашки измеряют по глубине, ширине и длине и учитывают по количеству в штуках на 1 м длины или на всю сторону сортимента. Требования к пороку строения «кармашек» (*gum pocket*, *risen pocket*) в лесопильной продукции содержатся в наиболее распространенных нормативных документах Российской Федерации (ГОСТ 26002-76 и ГОСТ 8486-86), стран западной Европы и Скандинавии (EN1611-1, СТБА, Nordic Timber) и стран Северной Америки (NLGA, SPIB, NeLMA, WCLIB). Из анализа стандартов следует, что нормирование порока осуществляется по количеству, ширине и длине выхода кармашка на пласть.

С целью захвата всех качественных зон ствола дерева были выпилены сердцевинные вырезки в направлении «север – юг» из всех заготовленных чураков. Толщина сердцевинной вырезки составляла 50 мм. Все полученные сердцевинные вырезки, промаркированные относи-

тельно сторон света и положения в стволе дерева, были рассмотрены на наличие смоляных кармашков.



**Рис. 1.** Схема разметки сердцевинной вырезки для снятия параметров исследуемого порока

Статистическая обработка массива данных была проведена при помощи специального программного обеспечения «Статистика» и «Origin Pro».

**Результаты исследования.** В результате исследований были изучены сердцевинные вырезки 53-х кражей, полученные из 10-ти отобранных модельных деревьев. Исследования проводились на обеих пластьях выпиленных вырезок «север – юг». На указанных пластьях были промаркированы и измерены 503 смоляных кармашка, размеры которых составляли более 9 мм в длину и от 0,5 мм в толщину. У отвечающих требованиям кармашков были измерены и запротоколированы следующие показатели: длина, мм; ширина или толщина, мм; расстояние от центра доски, мм; расстояние от верхнего торца доски, мм; положение относительно стороны света; характеристика зоны залегания при визуальной оценке качества.

Полученные массивы данных были обработаны стандартными статистическими методами с помощью программного обеспечения «Статистика». По собранным данным построены графики плотностей распределения кармашков, произведен их анализ.

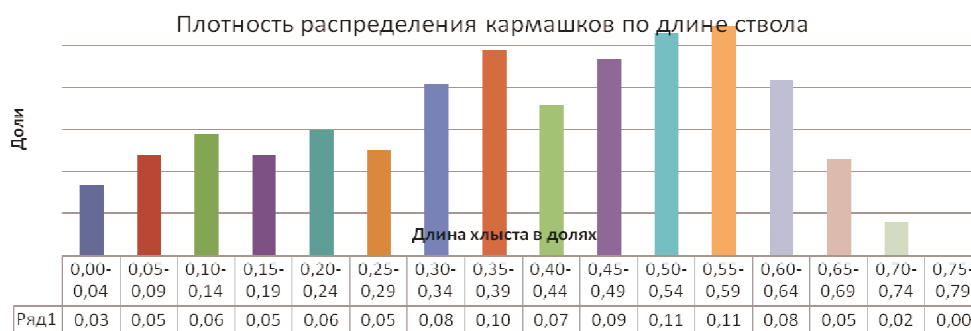
Анализ графиков распределения кармашков по группам длин и ширине позволяет говорить о том, что

длины кармашков в стволе дерева лиственницы даурской подчиняются законам нормального распределения.

Из анализа визуальной оценки качества пластей сердцевинных вырезок следует, что в зоне присучковой древесины располагаются кармашки, максимальная толщина которых находится в пределах от 1,5 до 2,5 мм, что на 0,5...1,0 мм больше максимальной толщины кармашков из других зон. Чаще максимальную толщину имеют кармашки, расположенные в древесине, пороки строения которой визуалью не были определены.

Анализ диаграммы распределения кармашков по сторонам света позволяет сделать вывод о том, что показатели отличаются незначительно, в пределах 3 %, что можно объяснить высокими широтами территории, на которой произрастали наблюдаемые деревья (полярная ночь, полярный день), а главное, равным распределением ветровой нагрузки в вегетативный период — летние месяцы.

Замечено значительное расхождение в количестве кармашков от ствола к стволу, что говорит о различных условиях произрастания деревьев. При отборе модельных деревьев были отобраны как деревья, расположенные в массиве, так и стоящие отдельно. Наибольшее количество кармашков найдено в отдельно росшем дереве, имевшем значительное искривление в прикорневой зоне. Меньшее количество кармашков было зафиксировано в стволах, выросших в глубине массива, т. е. в окружении других деревьев, большее количество — в стволах, произраставших на опушке древостоя.



**Рис. 2.** Распределение кармашков по относительной длине хлыста, суммарно для всех хлыстов

Анализ распределения по относительной длине ствола суммарно для всех 10-ти хлыстов выявил увеличение количества кармашков в срединной зоне ствола дерева, в местах отмирания ветвей (зона выход несросшихся сучков на поверхность ствола) и крепления

кроны. Значительно меньше кармашков в зоне живых ветвей — в вершине дерева. Средние показатели по количеству сучков соответствуют нижней части ствола дерева.





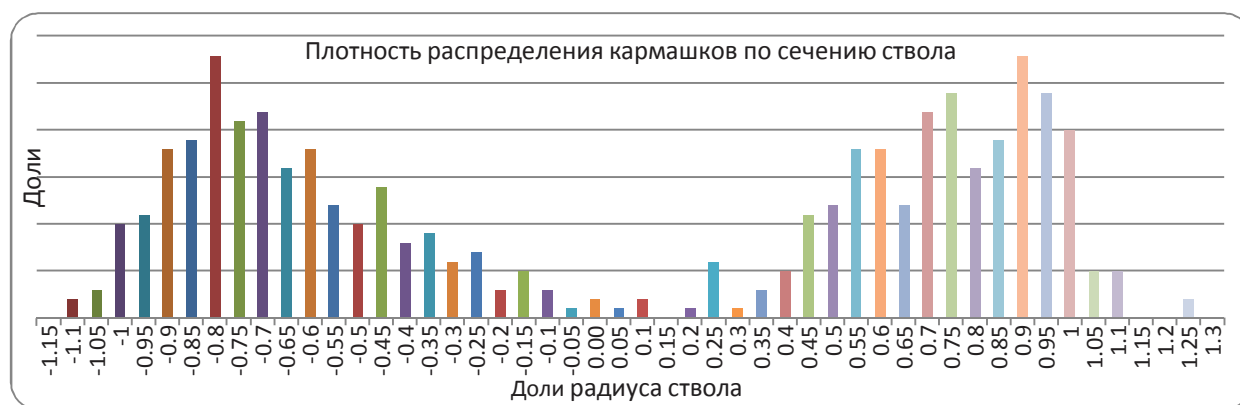


Рис. 3. Распределение кармашков по сечению ствола

На рис. 4 изображено распределение количества кармашков по относительной толщине ствола.

Отметим, что значения, расположенные за границей диаметра, менее  $-1$  и более  $1$ , — это кармашки в присучковой древесине, выступающей за пределы среднего диаметра в месте проведения замера.

Прежде всего, из анализа рисунка следует, что количество кармашков минимально в сердцевинной зоне ствола и возрастает по мере приближения к границе спелой древесины с заболонью, затем в заболонной зоне оно достигает максимума и стремительно уменьшается.

Также следует отметить, что пиковые значения количества кармашков из «беспорочной» древесины смещены ближе к центру ствола и лежат в пределах  $0,3...0,85$  долей радиуса ствола дерева. Максимальные значения кармашков присучковой древесины находятся в пределах от  $0,45$  до  $0,95$  долей радиуса ствола. Это объясняется тем, что смоляные кармашки, лежащие в пределах  $0,45...0,95$  долей ствола, возникли вследствие возникновения местных зон напряжения, а кармашки в пределах  $0,3...0,85$  долей радиуса ствола — вследствие одновременного снижения деформативных свойств древесины в указанной зоне и максимального изгибающего момента.

Анализ распределения количества смоляных кармашков в зависимости от качественных характеристик сопряженных зон показал, что  $24,45\%$  кармашков расположены в «беспорочной» древесине либо в древесине, в которой наличие порока визуально не определяется. Также необходимо заметить, что  $53,88\%$  кармашков находились в зоне со вторым пороком, а  $21,67\%$  — в зонах с тремя и более пороками.

Из анализа гистограммы следует, что наибольшее количество смоляных кармашков соответствует наличию такого порока, как сучки. Если объединить в одну группу кармашки из присучковой древесины, кармашки, расположенные при мутовках и кластерных сучках, а также около крупных ветвей и сучков, то их процент составит  $53,28$ . Процент кармашков заболонной и околозаболонной древесины занимает 2-е место и составляет  $35,39$ , что может служить косвенным подтверждением теории о значительном влиянии напряженно-деформированного состояния древесины на возникновение и расположение кармашков в стволе дерева, так

как присучковая древесина принимает внешние нагрузки, направленные на ветви дерева, а заболонная древесина испытывает максимальные растягивающие и сжимающие деформации при воздействии ветровой нагрузки на ствол дерева.

### Выводы

1. Количество кармашков различается в зависимости от формы ствола (прямой, с искривлением), ветвистостью, местоположением дерева (в глубине массива или на опушке).
2. Распределение длин и толщин кармашков в стволах лиственницы даурской подчиняется законам нормального распределения.
3. Разница в количестве кармашков, приходящихся на северную и южную стороны ствола, незначительна.
4. Распределение кармашков по длине ствола согласуется с местоположением его качественных зон, таких как комлевая часть, зона образования мутовок и залегания крупных ветвей, место крепления кроны. Максимальное количество кармашков приходится на вторую из трех секций по длине ствола.
5. По толщине ствола количество кармашков максимально в зоне, близкой к границе спелой древесины и заболони, примерно  $0,45...0,95$  отношения радиуса заболони к радиусу ствола.
6. Наличие и, вероятнее всего, возникновение кармашков связано с наличием и (или) возникновением других пороков древесины.
7. Замечена закономерность — обязательное наличие кармашков в присучковой древесине крупных ветвей.

### Литература

1. Докторов И.А., Охлопкова А.Ю. К вопросу оптимизации объемно-ценностного выхода пиломатериалов из древесины лиственницы даурской // Мат-лы II Всерос. науч.-практ. конф. «Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение». Якутск, 2011. С.11-15.
2. Erdtman H., Kimland B., Norin T., Daniels P.J.L. The constituents of the pocket resin from douglas fir *pseudotsugamenziesii* g // Acta Chemica Scandinavica. 1968. № 22 (3). P. 938-942.
3. Temnerud E., Valinger E., Sundberg B. Induction of Resin Pockets in Seedlings of *Pinus sylvestris* L. by Mechanical

- Bending Stress during Growth // *Holzforschung*. 1999. Vol. 53, № 4. P. 235-264.
4. Cown D.J. (1973). Resin pockets: their occurrence and formation in New Zealand forests // *New Zealand Journal of Forestry*. 1973. № 18 (2). P. 233-251.
5. Gjerdrum P., Bernabei M. Three-dimensional model for size and location of resin pockets in stems of Norway spruce // *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2007. № 65 (3). P. 201-208.
6. Oja J., Temnerud E. (1999) The appearance of resin pockets in CT-images of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) // *Holz als Roh- und Werkstoff*. 1999. Vol. 57. P. 400-406.
7. Адамович Э.И. Смоляные карманы и причины образования их у хвойных деревьев // *Тр. Молотовского с/х ин-та им. Д.М. Прянишникова*. Молотов, 1954. Вып. 24. С. 14-17.
8. Temnerud E. Formation and prediction of resin pockets in *Picea abies* (L.) karst. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 1997.
9. James K. DYNAMIC LOADING OF TREES // *Journal of Arboriculture*. 2003. Vol. 29 (3): May. P. 87-92.
10. Кузнецов А.И. Внутренние напряжения в древесине. Л.: Гослесбумиздат, 1950.
11. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесн. промышленность, 1978. 224 с.
12. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела: моногр. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1977. 416 с.
13. Глухих В.Н., Акопян А.Л. Начальные напряжения в древесине: моногр. СПб.: СПбГАСУ, 2016. 95 с.
14. Глухих В.Н., Черных А.Г. Анизотропия древесины. Технологический аспект. СПб.: СПбГАСУ, 2013. 240 с.
15. Глухих В.Н., Охлопкова А.Ю. Формирование кармашков в стволах деревьев лиственницы даурской // *Лесной журнал*. № 5, 2017. С. 35-52.
- качество, энерго- и ресурсобережение». Yakutsk, 2011. P. 11-15.
2. Erdtman H., Kimland B., Norin T., Daniels P.J.L. The constituents of the pocket resin from douglas fir *g pseudotsuga menziesii* g // *Acta Chemica Scandinavica*. 1968. № 22 (3). P. 938-942.
3. Temnerud E., Valinger E., Sundberg B. Induction of Resin Pockets in Seedlings of *Pinus sylvestris* L. by Mechanical Bending Stress during Growth // *Holzforschung*. 1999. Vol. 53, № 4. P. 235-264.
4. Cown D.J. (1973). Resin pockets: their occurrence and formation in New Zealand forests // *New Zealand Journal of Forestry*. 1973. № 18 (2). P. 233-251.
5. Gjerdrum P., Bernabei M. Three-dimensional model for size and location of resin pockets in stems of Norway spruce // *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2007. № 65 (3). P. 201-208.
6. Oja J., Temnerud E. The appearance of resin pockets in CT-images of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) // *Holz als Roh- und Werkstoff*. 1999. Vol. 57. P. 400-406.
7. Adamovich E.I. Resin pockets and the reasons for their formation in coniferous trees // *Tr. Molotovskogo s/kh in-ta im. D.M. Pryanishnikova*. Molotov, 1954. Vyp. 24. P. 14-17.
8. Temnerud, E Formation and prediction of resin pockets in *Picea abies* (L.) karst. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, 1997. Uppsala.
9. Ken James DYNAMIC LOADING OF TREES *Journal of Arboriculture* 29 (3). May 2003.
10. Kuznetsov A.I. Internal stresses in the wood. L.: Goslosbumizdat, 1950.
11. Ashkenazi E.K. Anisotropy of wood and wood materials. M.: Lesn. promyshlennost', 1978. 224 p.
12. Lekhnitskii S.G. The theory of elasticity of an anisotropic body. Izd. 2-e, pererab. i dop. M.: Nauka, 1977. 416 p.
13. Glukhikh V.N., Akopyan A.L. The initial stress in the wood: monogr. SPb.: SPbGASU, 2016. 95 p.
14. Glukhikh V.N., Chernykh A.G. Anisotropy of wood. Technological aspect. SPb.: SPbGASU, 2013. 240 p.
15. Glukhikh V.N., Okhlopova A.Yu. Formation of pockets in the trunks of larch trees of the Dahurian // *Forest Journal*. № 5, 2017. P. 35-52.

#### References

## Теоретический расчет конусного индекса заболоченного грунта

Е.Г. Хитров<sup>1 a</sup>, М.Н. Дмитриева<sup>1 b</sup>, В.А. Лухминский<sup>1 c</sup>, А.М. Хахина<sup>2 d</sup>,  
И.В. Григорьев<sup>3 e</sup>, В.А. Иванов<sup>4 f</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Якутская государственная сельскохозяйственная академия, ш. Сергеляхское 3, Якутск, Россия

<sup>4</sup>Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>a</sup>ye.gorkhitrov@gmail.com, <sup>b</sup>maryndmitrieva@gmail.com, <sup>c</sup>vladl1112@yandex.ru,

<sup>d</sup>hahin@mail.ru, <sup>e</sup>silver73@inbox.ru, <sup>f</sup>ivanovva55@mail.ru

Статья поступила 1.10.2017, принята 16.10.2017

*Целью исследования является получение зависимости, связывающей сопротивление заболоченного почвогрунта вдавливаю конического индентора с модулем деформации грунта. Результаты получены на базе экспериментальных сведений о физико-механических свойствах заболоченных грунтов и теоретических зависимостей механики контактного взаимодействия. При получении расчетных зависимостей использованы численные методы аппроксимации данных. На первом этапе исследования по результатам аппроксимации статистических сведений о физико-механических свойствах покрытия мохового, травяного, лесного и осушенного болота получены линейная зависимость удельного сцепления заболоченного почвогрунта от модуля деформации, логарифмическая зависимость угла внутреннего трения заболоченного почвогрунта от модуля деформации и линейная зависимость модуля сдвига заболоченного почвогрунта от модуля деформации. На втором этапе выполнен теоретический расчет конусного индекса с использованием зависимостей, полученных предыдущими исследователями, апробированных и подтвержденных экспериментально для глинистых и суглинистых грунтов, а также для лесных почвогрунтов. Расчет выполнен при диаметре основания конуса 35,7 мм, длине конической части пенетromетра 31 мм, угле при вершине конуса 30° с использованием выражений для угла внутреннего трения, внутреннего сцепления и модуля сдвига через модуль деформации, полученных на первом этапе. По результатам аппроксимации расчетных данных получена линейная зависимость для оценки конусного индекса по модулю деформации заболоченного почвогрунта (также приводится формула для оценки модуля деформации заболоченного почвогрунта по конусному индексу). Коэффициент пропорциональности в полученной зависимости, равный 1,1319, сравнен с известным ранее экспериментальным значением коэффициента пропорциональности органоминеральных глинистых грунтов (шлов), находящимся в пределах от 0,4 до 4. На основании результатов сравнения сделан вывод о том, что полученная линейная зависимость в целом не противоречит опубликованным ранее экспериментальным данным.*

**Ключевые слова:** конусный индекс; модуль деформации; заболоченный почвогрунт; физико-механические свойства грунта; контактная задача.

## Theoretical estimation of wetland soil cone index

E.G. Khitrov<sup>1 a</sup>, M.N. Dmitrieva<sup>1 b</sup>, V.A. Lukhminskij<sup>1 c</sup>, A.M. Khakhina<sup>2 d</sup>,  
I.V. Grigorev<sup>3 e</sup>, V.A. Ivanov<sup>4 f</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Yakutsk State Agricultural Academy; 3rd km, 3, Sergelyakhskoe Highway, Yakutsk, Russia

<sup>4</sup>Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup>ye.gorkhitrov@gmail.com, <sup>b</sup>maryndmitrieva@gmail.com, <sup>c</sup>vladl1112@yandex.ru,

<sup>d</sup>hahin@mail.ru, <sup>e</sup>silver73@inbox.ru, <sup>f</sup>ivanovva55@mail.ru

The article was received 1.10.2017, adopted 16.10.2017

*The aim of the study is to obtain a relationship linking wetland soil resistance to indentation of the conical indenter and the soil deformation modulus. The research results are obtained on the basis of experimental data on the physical and mechanical properties of wetland soils and theoretical dependencies of contact mechanics. When obtaining the calculated dependencies, numerical methods of data approximation are used. In the first stage, the study obtains a linear dependence of the inner cohesion of wetland soil of the deformation modulus, logarithmic dependence of the angle of internal friction of wetland soil on the module of deformation and linear dependence of the shear modulus deformation of wetland soil of the deformation modulus. The dependencies come as a result of approximation of statistical data on the physical and mechanical properties of moss, grass, forest and dry swamp. The second stage provides calculation of the cone index with the theoretical dependencies, obtained by previous researchers and verified experimentally for clay and loam soils, as well as for forest soils. Calculation is made with a base cone diameter of 35,7 mm, the length of the conical portion penetrometer 31 mm, the cone apex angle of 30° using the expressions for the angle of internal friction,*

*cohesion and shear modulus through deformation modulus obtained in the first stage. As a result of the calculated data approximation, the study obtains a linear dependence to assess the cone index of wetland soil with deformation modulus (as well as a formula for estimating deformation modulus of wetland soil with cone index). The proportionality factor in the resulting dependence equals to 1,1319, compared with previously known experimental value of the coefficient for organic-clay soils (silt), ranging from 0,4 to 4. Basing on the comparison of the results, the paper concludes that, in general, linear relationship, obtained in the paper, is consistent with experimental data published previously.*

**Keywords:** cone index; deformation modulus; waterlogged soils; physical and mechanical properties of soil; contact problem.

### Введение

В зарубежных исследованиях представлено множество моделей для прогноза тягово-сцепных свойств и глубины колеи, полученных при помощи WES-метода.

WES-метод предполагает построение моделей либо по результатам полевых испытаний техники, либо по экспериментальным данным, полученным на модельных стендах.

При этом основной характеристикой почвогрунта является показатель сопротивления вдавливанию конического индентора — конусный индекс (*cone index*), определяемый экспериментально при помощи стандартизованного прибора (пенетromетра) и представляющий собой отношение усилия вдавливания пенетromетра к площади горизонтальной проекции конической части наконечника пенетromетра. Конусный индекс является интегральной характеристикой прочностных свойств почвогрунта.

Результаты экспериментальных замеров тягово-сцепных свойств или глубины колеи аппроксимируют функциями конусного индекса почвогрунта и движителя машины (приведенная нагрузка, геометрические параметры движителя, жесткость). Эти приближенные функции и называются WES-моделями.

У WES-моделей есть очевидные достоинства: они просты в использовании и близки к опытным данным. Но для их построения необходимы обширные, трудоемкие эксперименты. Сугубо эмпирический характер затрудняет анализ и обобщение взаимосвязей факторов, включаемых в модели, и исследуемых показателей процесса взаимодействия движителя машины с почвогрунтом.

В отечественной школе разработан теоретический аппарат, базирующийся на решениях ряда задач о вдавливании штампа (как модели движителя) в деформируемое полупространство (как модели почвогрунта). Теория позволяет учесть как геометрию, так и жесткость штампа, что делает возможными расчеты для шин различной конструкции. В расчетных зависимостях свойства почвогрунта характеризуют несколько показателей — модуль деформации, удельное сцепление, угол внутреннего трения, модуль сдвига, удельный вес, толщину деформируемого слоя.

Теоретические зависимости нуждаются в экспериментальной проверке. Можно предположить, что источником сведений для проверки могут являться WES-модели. Но для этого необходимо соотнести характеристики почвогрунта в рамках двух подходов, т. е. принять зависимость для расчета конусного

индекса по физико-механическим свойствам почвогрунта, используемым в теории.

*Целью настоящей работы* является получение зависимости, связывающей сопротивление заболоченного почвогрунта вдавливанию конического индентора с модулем деформации грунта.

*Материалы и методы исследования.* Результаты исследования получены на базе экспериментальных сведений о физико-механических свойствах заболоченных грунтов и теоретических зависимостей механики контактного взаимодействия. При получении расчетных зависимостей использованы численные методы аппроксимации данных.

**Результаты исследования. Физико-механические свойства заболоченного грунта.** Данные о физико-механических свойствах заболоченных грунтов по [1] представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства заболоченных грунтов

Вид болота	Характеристика дернового покрова	$\varphi, ^\circ$	$C, \text{кПа}$	$E, \text{МПа}$	$G, \text{МПа}$
Моховое	Преобладают сфагновые мхи без кустарника	12–14	5–8	0,26–0,29	0,36–0,43
	Преобладают сфагновые мхи с кустарником	13–16	10–17	0,36–0,43	0,48–0,63
	Преобладают гипновые мхи с кустарником	11–15	8–14	0,29–0,34	0,43–0,57
Травяное	Осоковый покров с развитыми осоковыми кочками	18–20	26–45	1,05–1,58	0,84–1,26
	Осоковый покров с межкочечными понижениями	3–8	4–14	0,14–0,24	0,34–0,57
Лесное	Березово-лесной в межкочечных понижениях	5–7	4–10	0,09–0,14	0,34–0,48
Осушенное	Гипново-осоково-лесной	16–20	30–50	0,65–1,4	0,93–1,38

Данные, представленные в табл. 2, проиллюстрированы графиками на рис. 1–3.



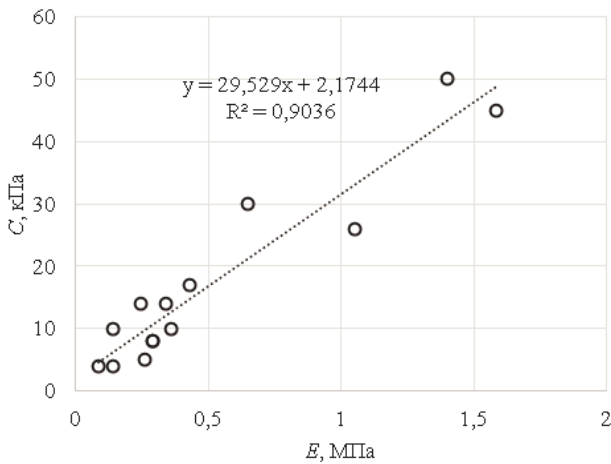


Рис. 1. Зависимость удельного сцепления заболоченного почвогрунта от модуля деформации

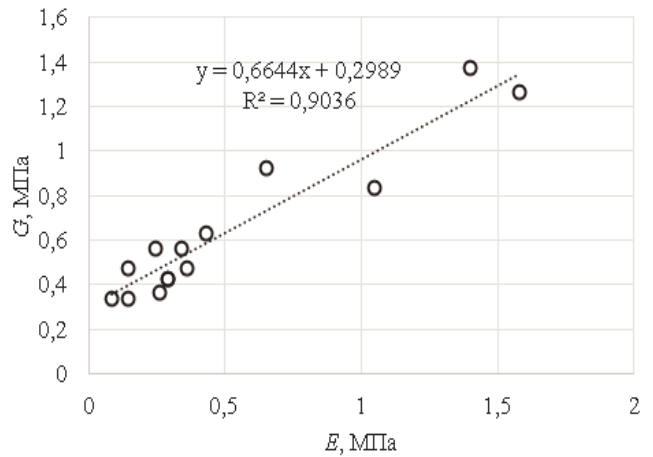


Рис. 3. Зависимость модуля сдвига заболоченного почвогрунта от модуля деформации

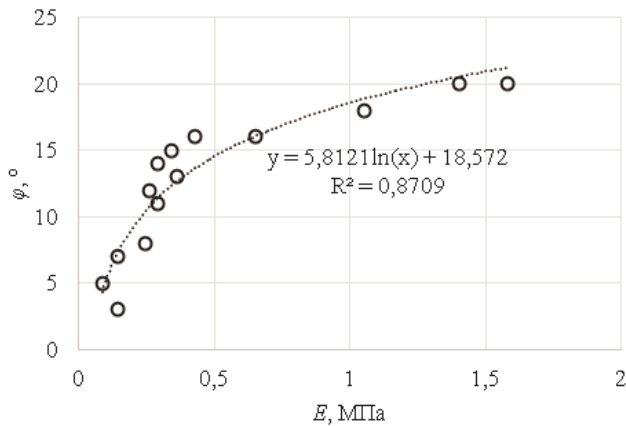


Рис. 2. Зависимость угла внутреннего трения заболоченного почвогрунта от модуля деформации

Величины  $C$  [кПа],  $\varphi$  [°] и  $G$  [МПа] можно с удовлетворительной точностью выразить через модуль деформации  $E$  [МПа] при помощи следующих аппроксимированных зависимостей:

$$C = 29,529E + 2,1744 \quad (1)$$

$$\varphi = 5,812 \ln E + 18,572 \quad (2)$$

$$G = 0,6644E + 0,2989 \quad (3)$$

**Расчет конусного индекса.** Конусный индекс определяется, как правило, опытным путем при помощи специального прибора — стандартного penetromетра, представляющего собой металлический стержень с коническим наконечником (эскиз представлен на рис. 4).

Ручной penetromетр вдавливают на определенную глубину  $Z$  ( $Z \approx 2L$ ), и при помощи индикатора замеряется усилие вдавливания  $F_z$ . Конусный индекс определяется путем деления зарегистрированного значения усилия вдавливания на площадь проекции наконечника на плоскость вдавливания [2].

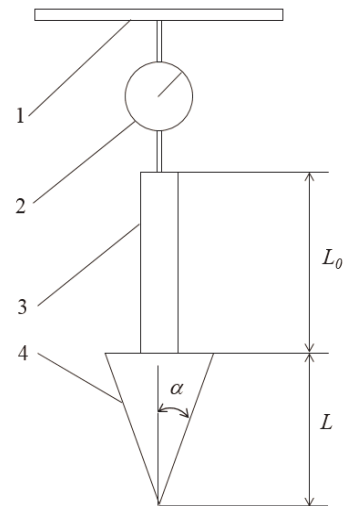


Рис. 4. Эскиз конусного penetromетра: 1 — рукоять; 2 — индикатор усилия вдавливания; 3 — металлический стержень; 4 — металлический наконечник

Геометрические параметры стандартных ручных конусных penetromетров по ГОСТ 19912-2012 и международному стандарту ISO 22476-1 представлены в табл. 2.

Известны работы, например [2], в которых приводятся зависимости для расчета конусного индекса с использованием фундаментальных механических характеристик грунта, а именно угла внутреннего трения, внутреннего сцепления и модуля сдвига.

Таблица 2

Геометрические параметры стандартных ручных конусных penetromетров

Параметр	ГОСТ 19912-2012	ISO 22476-1
$L$	31 мм	1,48 "
$d$	35,7 мм	1,71 "
$\alpha$	30°	30°

В таблице обозначены:  $d$  — диаметр основания конуса;  $L$  — длина конической части penetromетра;  $\alpha$  — угол при вершине конуса.



Расчетная схема процесса вдавливания конуса пенетromетра в грунт представлена на рис. 5.

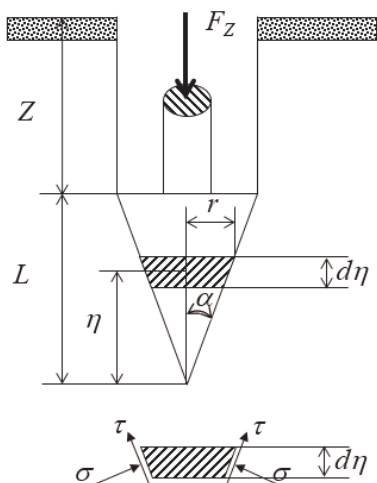


Рис. 5. Расчетная схема процесса вдавливания конусного пенетromетра в грунт

Усилие вдавливания  $F_Z$  определяется по формуле [2, 3]:

$$F_Z = \int_0^L (\sigma \operatorname{tg} \alpha + \tau) \cdot 2\pi \eta \operatorname{tg} \alpha d\eta, \quad (4)$$

где  $\sigma$  — нормальная к плоскости конуса составляющая сопротивления вдавлыванию;  $\tau$  — касательная к плоскости конуса составляющая сопротивления вдавлыванию;  $\eta$  — координата элементарного поперечного сечения конуса.

Нормальная составляющая сопротивления вдавлыванию определяется по формуле [2]:

$$\sigma = 3 \frac{1 + \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} (q + C \operatorname{ctg} \varphi) \cdot \left( \frac{G}{C + q \operatorname{tg} \varphi} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{3(1 + \sin \varphi)}} - C \operatorname{ctg} \varphi, \quad (5)$$

$$q = (Z + L - \eta) \cdot \gamma,$$

где  $\gamma$  — объемный вес грунта;  $G$  — модуль сдвига грунта.

Касательная составляющая сопротивления вдавлыванию определяется по формуле [2]:

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (6)$$

Непосредственно конусный индекс  $CI$  рассчитывается при известном значении  $F_Z$  по формуле [2]:

$$CI = \frac{4F_Z}{\pi d^2} \quad (7)$$

Аналитическое выражение для расчета конусного индекса имеет вид [2, 4]:

$$CI = -C \cot \varphi + \Theta \cdot \frac{24G^m (\tan \alpha + \tan \varphi) (1 + \sin \varphi) \tan \alpha}{d^2 \gamma^2 (m - 2)(m - 3)(3 - \sin \varphi) \tan^3 \varphi} \quad (8)$$

$$\Theta = \{C + (Z + L) \cdot \gamma \tan \varphi\}^{3-m} - \{C + Z \cdot \gamma \tan \varphi\}^{2-m} \cdot \{C + (Z + 3L - Lm) \cdot \gamma \tan \varphi\}$$

Ранее зависимость (8) была апробирована и подтверждена экспериментально для глинистых и суглинистых грунтов [2], а также для лесных почвогрунтов [4, 5].

Ранее было показано [4], что удельный вес почвогрунтов  $\gamma$  в расчетах по формуле (8) можно принять постоянной величиной, равной  $14 \text{ кН/м}^3$ , без существенной потери точности.

Результаты расчета конусного индекса по формуле (8), в которой физико-механические свойства почвогрунта выражены по зависимостям (1) – (3), представлены графиком на рис. 6.

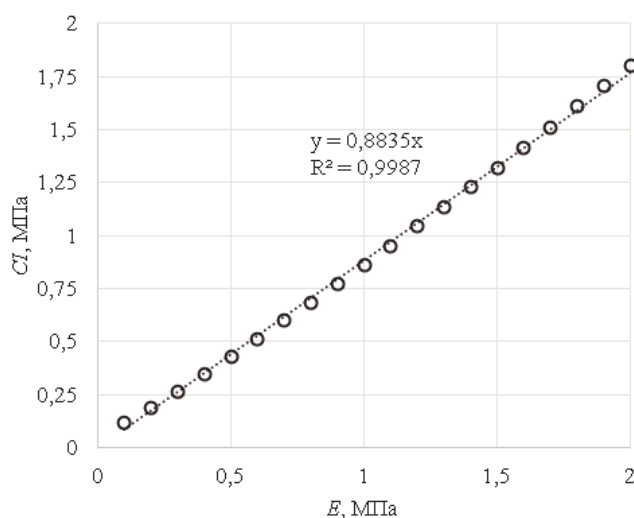


Рис. 6. Зависимость конусного индекса при вдавлывании пенетromетра в заболоченный почвогрунт от модуля деформации

По результатам аппроксимации расчетных данных получим зависимость для оценки конусного индекса по модулю деформации заболоченного почвогрунта:

$$CI = 0,8835 E. \quad (9)$$

Формулу для оценки модуля деформации заболоченного почвогрунта получим, выразив модуль деформации из зависимости (9):

$$E = 1,1319 CI. \quad (10)$$

Отметим, что в работах [6–9] также приводится зависимость для оценки модуля деформации грунта по конусному индексу в виде линейной функции:

$$E = a_K CI \quad (11)$$

Значения коэффициента  $a_K$  в формуле (11) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициент пропорциональности при расчете модуля деформации грунта по конусному индексу [6–9]

Грунты	Сопротивление грунта внедрению конуса $C_I$ , МПа	Коэффициент пропорциональности $a_K$
Суглинки и глины низкой пластичности	$< 0,7$	3–8
	0,7–2	2–5
	$> 2$	1–2,5
Суглинки легкие, супеси	$< 2$	3–6
	$> 2$	1–3
Суглинки тяжелые, глины высокой пластичности	$< 2$	2–6
Органоминеральные глинистые грунты	$< 1,2$	2–8
Торф и органо-минеральные глинистые грунты (илы)	$< 0,7$	
	$50 < W < 100$	1,5–4
	$100 < W < 200$	1–1,5
	$W > 200$	0,4 – 1

Отметим, что по табл. 3 коэффициент пропорциональности органоминеральных глинистых грунтов (илов) находится в пределах от 0,4 до 4. В нашем случае для заболоченных почвогрунтов расчетным путем получен коэффициент пропорциональности в формуле (10), равный 1,1319, что в целом не противоречит опытным данным, представленным в табл. 3.

Считаем целесообразным проведение в дальнейшем экспериментальных расчетов с целью верификации математических моделей (9), (10).

#### Литература

1. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
2. Rohani B., Baladi G.Y. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981. 41 p.
3. Vesic A.S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1972. № 98. 113-123 p.
4. Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Хахина А.М. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 146 с.

5. Устинов В.В. Экспериментальные исследования сопротивления почвогрунта при вдавлении конического индентора // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6, № 3 (23). С. 188-196.

6. Зиангиров Р.С. Каширский В.И. Оценка деформационных свойств дисперсных грунтов по данным статического зондирования. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2005. № 1. С. 12-16.

7. Sandven N., Senneset K., Janbu N. Interpretation of piezocone tests in cohesive soils. Penetration Testing 1988, ISOPT-1, Rotterdam. P. 939-953.

8. Senneset K., Janbu N., Svano G. Strength and deformation parameters from cone penetration tests. Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. ESOPT – I. Amsterdam, 1982. Vol. 2. P. 863-870.

9. Van Impe W.F. The evaluation deformation and bearing capacity parameters of foundations from static CPT-results // Proc. Fourth Int. Geotechnical seminar // Filed instrumentation and in-site measurements. Singapore, 1986. P. 51-70.

#### References

1. Ageikin Ya.S. Passability of cars. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 p.
2. Rohani B., Baladi G.Y. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981. 41 p.
3. Vesic A.S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1972. № 98. 113-123 p.
4. Khitrov E.G., Grigor'ev I.V., Khakhina A.M. Improving the efficiency of logging justification performance forest machines in operational control of soil-ground properties. SPb.: SPbGLTU, 2015. 146 p.
5. Ustinov V.V. Experimental studies of soil resistance with indentation of a conical indenter // Lesotekhnicheskii Zhurnal. 2016. Т. 6, № 3 (23). P. 188-196.
6. Zianguirov R.S., Kashirskii V.I. Evaluation of the deformation properties of dispersed soils according to static sensing data // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2005. № 1. P. 12-16.
7. Sandven N., Senneset K., Janbu N. Interpretation of piezocone tests in cohesive soils. Penetration Testing 1988, ISOPT-1, Rotterdam. P. 939-953.
8. Senneset K., Janbu N., Svano G. Strength and deformation parameters from cone penetration tests. Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. ESOPT - I. Amsterdam, 1982. Vol. 2. P. 863-870.
9. Van Impe W.F. The evaluation deformation and bearing capacity parameters of foundations from static CPT-results // Proc. Fourth Int. Geotechnical seminar // Filed instrumentation and in-site measurements. Singapore, 1986. P. 51-70.

## Исследование влияния физических свойств и строения древесины сосны на ее прочность

А.А. Тамби<sup>1 a</sup>, О.В. Юркова<sup>2 b</sup>, О.А. Куницкая<sup>3 c</sup>, М.В. Степанищева<sup>4 d</sup>

<sup>1</sup>ООО «ГИС», пр. Товарищеский д. 22, кор. 3, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Якутская государственная сельскохозяйственная академия, ш. Сергеляхское 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

<sup>4</sup>Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>a</sup>a\_tambi@mail.ru, <sup>b</sup>olesya\_yurkova@tiswood.ru, <sup>c</sup>ola.ola07@mail.ru, <sup>d</sup>marina01031977@inbox.ru

Статья поступила 1.10.2017, принята 16.10.2017

*В производстве материалов, изделий и конструкций из древесины необходимо учитывать ее физические свойства и строение. Основными факторами, которые оказывают влияние на технологические и эксплуатационные свойства выпускаемой продукции, являются плотность и прочность древесины. Помимо того что плотность вариативна в рамках одной породы, она неравномерно распределяется по всему объему. Прочность древесины имеет тесную связь с плотностью, однако на характер ее изменения также оказывает влияние угол направления волокон. Совместная оценка этих факторов позволит повысить качественный и спецификационный выход продукции путем исключения из производственного процесса древесины с заведомо несоответствующими свойствами, что особенно важно при изготовлении конструктивных пиломатериалов.*

*На основании результатов исследований установлено местоположение имеющих разную прочность зон древесины в объеме хлыста сосны. Прогнозирование прочностных свойств позволит увеличить выход конструктивных пиломатериалов путем обоснования схем раскроя хлыстов и бревен. Кроме того, были определены закономерности изменения угла наклона волокон древесины в объеме хлыста сосны при распиловке вдоль центральной оси формируемых из него пиловочных бревен. Полученные математические модели повышают достоверность прогнозирования и оценки механических свойств при прочностной сортировке пиломатериалов, а их внедрение в технологические процессы лесозаготовительных и лесопильных предприятий способствует увеличению выхода пиломатериалов с заданными свойствами. Применение на практике результатов исследования позволяет обеспечить рациональное использование и сохранение древесины, а также снижение стоимости конструктивных пиломатериалов.*

**Ключевые слова:** плотность древесины; угол наклона волокон; прочность пиломатериалов.

## Research of the influence of the physical properties and structure of pine wood on its strength

A.A. Tambi<sup>1 a</sup>, O.V. Yurkova<sup>2 b</sup>, O.A. Kunitskaya<sup>3 c</sup>, M.V. Stepanishcheva<sup>4 d</sup>

<sup>1</sup>"TIS" Ltd; 22, Tovarishcheskiy Per., Building #3, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Yakutsk State Agricultural Academy; 3rd km, 3, Sergelyakhskoe Highway, Yakutsk, Russia

<sup>4</sup>Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup>a\_tambi@mail.ru, <sup>b</sup>olesya\_yurkova@tiswood.ru, <sup>c</sup>ola.ola07@mail.ru, <sup>d</sup>marina01031977@inbox.ru

Received 1.10.2017, accepted 16.10.2017

*In the production of materials, products and constructions made of wood, it is necessary to know the physical properties and structure of wood. The main factors that influence the technological and operational requirements of the products are their density and strength. In addition to the fact that the density is variable within a type of wood, it is not evenly located throughout the volume. The strength of wood is strongly dependent on the density. Nevertheless, it is also influenced by the slope of the wood fibers. Joint assessment of these factors will allow to increase the qualitative and specification output of products by excluding wood with obviously inappropriate properties from the production process, which is especially important in the production of structural lumber. The results of the research set the location of the wood in the volume of the pine trunks with different strength. Forecasting strength properties will increase the amount of structural sawn timber by justifying schemes for cutting tree lengths and logs. The regularities of the change in the angle of inclination of wood fibers in the volume of the pine whip were determined when cutting saw logs formed from it along the central axis. The received mathematical models allow to increase reliability of an estimation of mechanical properties at strong sorting of saw-timbers. Their introduction in technological processes of timber cutting and sawmill enterprises will allow to increase an output of saw-timbers with the required properties. The use of research results allows ensuring the rational use and preservation of wood, which will reduce the cost of structural sawn timber.*

**Key words:** wood density; slope of wood fibers; strength of sawn timber.

## Введение

Промышленными предприятиями Российской Федерации выпускается большое количество материалов, изделий и конструкций из древесины, отличающихся как назначением, так и условиями эксплуатации. Помимо видимых пороков древесины, определяющих сорт пиломатериалов в соответствии со стандартами РФ, при изготовлении ответственных конструкций необходимо учитывать изменчивость физико-механических характеристик древесины, проявляющихся даже в рамках одной породы [1–8]. Прочностные свойства сортиментов в зависимости от их назначения регламентируются соответствующими ГОСТ и СП, предъявляющими к древесине дополнительные, как правило, более жесткие требования, чем стандарты на продукцию первичной механической обработки.

Основными факторами, оказывающими влияние на технологические и эксплуатационные свойства продукции из древесины, являются ее плотность и прочность при соответствующем уровне влажности. Известно [1, 2, 9], что плотность древесины неравномерно распределяется в объеме круглых лесоматериалов. Разработанные денситограммы основных пород древесины [10, 11] в совокупности с применением современных методов неразрушающего контроля на базе компьютерной и магнитно-резонансной томографии [12, 13] позволяют достоверно определить изменение плотности в объеме сортиментов из древесины.

Установлено [14–19], что прочность древесины имеет тесную связь с плотностью, однако на характер ее изменения оказывают влияние не только возраст древесины и

наличие пороков, но и положение сортимента в сердцевинной, ювенильной, ядровой или заболонной зоне [20], а также угол наклона волокон древесины [1–3].

Необходимость использования в строительстве конструктивных пиломатериалов с нормируемыми прочностными характеристиками регламентируется ГОСТ 20850-2014 «Конструкции деревянные клееные. Общие технические условия», что требует совершенствования производственных процессов распиловки круглых лесоматериалов, направленного на увеличение выхода пиломатериалов с заданными физико-механическими характеристиками.

Повышение прочностных свойств пиломатериалов возможно путем внедрения предварительной оценки свойств круглых лесоматериалов на этапе выполнения лесозаготовительных работ [9], а также при составлении схем раскроя с учетом распределения физико-механических свойств в объеме круглых лесоматериалов.

Целью исследования являются определение влияния строения древесины на ее механические характеристики, а также выявление качественных зон в объеме круглых лесоматериалов, обладающих различной прочностью.

**Методика исследований.** Объектом исследования стали хлысты сосны, заготовленной в Ленинградской области. Для проведения испытаний выполнена их раскряжевка с шагом 2 м, в результате чего получены секции длиной 300 мм. Из них выпилены образцы прямоугольной формы размерами 20x20x300 мм (рис. 1).

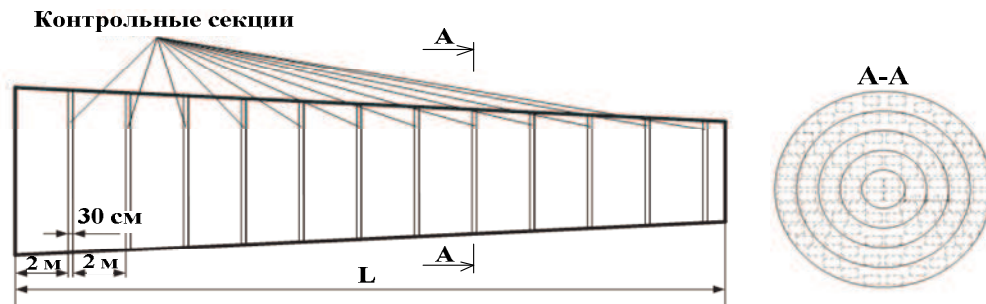


Рис. 1. Схема получения контрольных образцов

Полученные образцы были высушены до влажности  $12 \pm 1 \%$ , после чего по формуле (1) определена их плотность,  $кг/м^3$ :

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{b \cdot h \cdot l}, \quad (1)$$

где  $m_{12}$  — масса испытуемого образца при влажности  $W = 12 \pm 1 \%$ , кг;  $h$  — высота образца, м;  $b$  — ширина образца, м;  $l$  — длина образца, м.

Распиловка раскряжеванных сортиментов выполнялась вдоль центральной оси с целью моделирования реальных условий раскроя бревен в процессе лесопиления. У каждого образца в соответствии с методикой ГОСТ 2140-81 «Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения» определялся наклон волокон по пласти и кромке в соответствии со схемой рис. 2. Пересчет экспериментальных значений выполнялся по формуле (2):

$$z = \frac{a}{b} \cdot 100, \quad \%, \quad (2)$$

где  $z$  — наклон волокон, %;  $b$  — длина общего направления волокон;  $a$  — отклонение волокон от продольной оси.

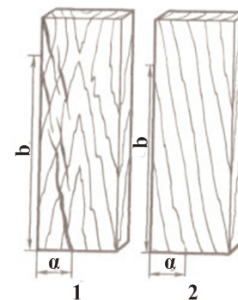


Рис. 2. Схема измерения наклона волокон: 1 — тангентальный наклон волокон в пиломатериале; 2 — радиальный наклон волокон на радиальной поверхности пиломатериала



Определение прочности древесины при статическом изгибе выполнялось с использованием разрывной машины Р-5 в соответствии с известной методикой [1]. Прочность древесины определяли по формуле (3), МПа. Схема нагружения образца при статическом изгибе приведена на рис. 3.

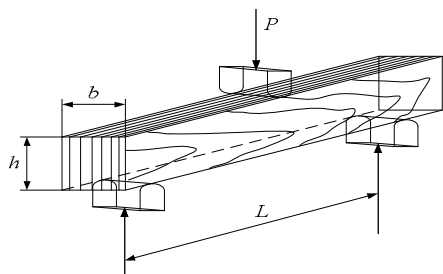


Рис. 3. Схема испытания древесины при статическом изгибе

$$\sigma_w = \frac{3P_{\max}L}{2bh^2}, \text{ МПа} \quad (3)$$

где  $P_{\max}$  — максимальная нагрузка, Н;  $L$  — расстояние между центрами опор,  $L = 240$  мм;  $b$  — ширина образца, мм,  $b = 20$  мм;  $h$  — высота образца, мм,  $h = 20$  мм.

Математическая обработка полученных результатов произведена в соответствии с методикой [21] с использованием инструментов программного комплекса Statistica v.10. В нем же методом наименьших квадратов с использованием инструмента «карты линий уровня» рассчитан полигон распределения прочности в объеме хлыста.

**Результаты исследований и их анализ.** На основании проведенных исследований определены числовые параметры коэффициентов уравнения П.Н. Хухрянского [22] для условий Ленинградской области, описывающего связь между прочностью и плотностью древесины:

$$\tau = 0,36 \cdot \rho - 90,55, \text{ МПа} \quad (4)$$

где  $\tau$  — прочность древесины, МПа;  $\rho$  — плотность древесины, кг/м<sup>3</sup>.

Уравнение (4) корректно описывает связь средних значений плотности и прочности древесины,  $R^2 = 0,98$  (рис. 4), но, поскольку коэффициент вариации для отдельных значений достигает 23,3 %, в математическую модель необходимо введение дополнительных факторов, учитывающих влияние на прочность структуры древесины.

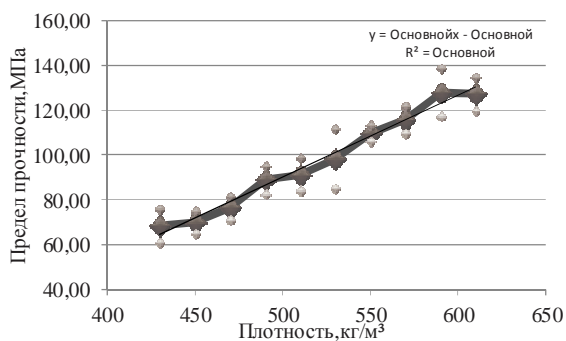


Рис. 4. Влияние плотности древесины на ее прочность при статическом изгибе

Известно, что на прочность древесины оказывает влияние наличие искусственного косослоя [1, 3] (табл. 1), а также изменение угла наклона волокон, измеренного на торце образцов [1].

Таблица 1

Влияние искусственного косослоя на прочность древесины сосны [3]

Свойства древесины	Прочность косослойной древесины, %, от прочности прямослойной древесины при наклоне волокон			
	5	9	17,5	27
Прочность при сжатии вдоль волокон	99,5	96,5	90,5	80,0
Прочность при статическом изгибе	94,0	90,5	66,0	51,5

В соответствии со схемой испытаний (рис. 2) были определены закономерности изменения угла наклона волокон древесины в объеме хлыста сосны при распиловке формируемых из него пиловочных бревен вдоль центральной оси. Установлено, что наклон волокон по пласти в среднем изменяется в диапазоне от 0 до 3 %, по кромке — от 0 до 10 %.

Схемы изменения наклона волокон в объеме хлыста сосны приведены на рис. 5, 6.

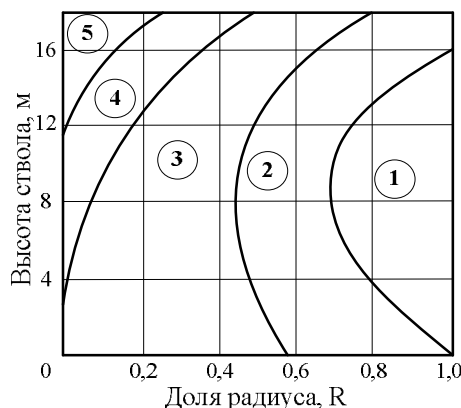


Рис. 5. Изменение угла наклона волокон по пласти образцов в объеме ствола дерева, %: 1 — менее 1,3; 2 — 1,3–2,3; 3 — 2,3–3,5; 4 — 3,5–5; 5 — более 5

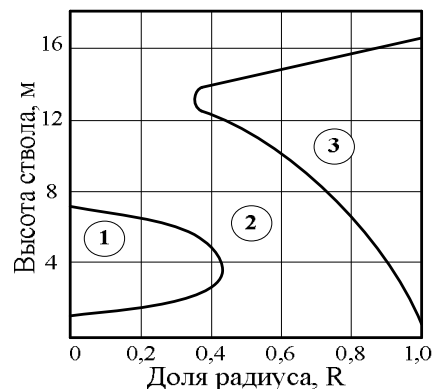


Рис. 6. Изменение угла наклона волокон по кромке образцов в объеме ствола дерева, %: 1 — более 7; 2 — 3–7; 3 — менее 3

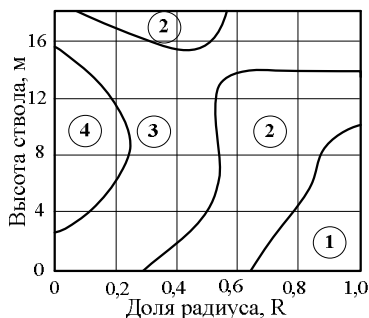
Анализ рис. 5, 6 и данных табл. 1 позволяет сделать вывод о необходимости включения в математическую модель оценки прочности древесины (4) факторов, учитывающих наклон волокон.

Введение их в математическую модель (4) позволяет увеличить точность оценки прочности древесины, МПа, на 6,5 % — уравнение (5),  $R^2 = 0,75$ .

$$y = -94,6 - 0,3x_1 - 0,82x_2 + 0,37x_3 + 0,05x_4, \text{ МПа}, \quad (5)$$

где  $x_1$  — угол наклона волокон по кромке, %, 0–7;  $x_2$  — угол наклона волокон по пласти, %, 0–10;  $x_3$  — плотность древесины, 400–650 кг/м<sup>3</sup>;  $x_4$  — угол наклона волокон на торце, 60–90°.

В результате исследований получена схема распределения прочности древесины в объеме хлыста сосны. С ее помощью может быть выполнена предварительная оценка механических свойств пиломатериалов, основанная на их местоположении в объеме хлыста при влажности  $12 \pm 1$  % (рис. 7). Влияние местоположения сортимента в объеме хлыста на прочность древесины может быть описано уравнением (6),  $R^2 = 0,71$ .



**Рис. 7.** Распределение прочности древесины в объеме ствола сосны, МПа: 1 — более 100; 2 — 80–100; 3 — 65–80; 4 — менее 64

$$y = 48,6 - 0,57x_1 + 81,4x_2, \text{ МПа}, \quad (6)$$

где  $x_1$  — высота ствола дерева, м,  $0 < x_1 < 20$ ;  $x_2$  — доля радиуса хлыста, *o.e.*,  $0 < x_2 < 1$ .

Определенная закономерность изменения прочности древесины в объеме хлыста позволяет прогнозировать свойства формируемых сортиментов на этапе лесозаготовительных работ и может применяться при обосновании схем раскряжевки круглых лесоматериалов в зависимости от назначения конечной продукции. Кроме того, использование математической модели (6) позволит лесопильным предприятиям формировать схемы раскряжки пиловочных бревен с учетом качественных характеристик сырья, что обеспечит увеличение объемного выхода конструкционных пиломатериалов.

#### Выводы и перспективы дальнейших исследований

1. Прочность древесины сосны обладает высокой вариативностью в объеме хлыста, что должно учитываться при разработке схем раскряжки круглых лесоматериалов.

2. В результате проведенных исследований определены коэффициенты классического уравнения П.Н. Хухрянского для условий Ленинградской области, описывающие связь между прочностью и плотностью древесины.

3. Введение в известную модель уточняющих факторов, учитывающих влияние наклона волокон древесины, позволило повысить точность оценки прочности на 6,5 %.

4. На основании экспериментальных данных составлена схема распределения прочности в объеме хлыста сосны для условий Ленинградской области.

5. Внедрение полученных моделей в технологические процессы лесозаготовительных и лесопильных предприятий позволит увеличить выход конструкционных пиломатериалов с заданными механическими характеристиками.

6. Представляется перспективным проведение дальнейших исследований с целью анализа влияния прироста и тангенциального наклона волокон, а также микростроения древесины на ее механические характеристики.

#### Литература

1. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами товароведения. М.: Лесн. промышленность, 2005. 366 с.
2. Волынский В.Н. Взаимосвязь и изменчивость показателей физико-механических свойств древесины. 2-е изд. Архангельск: АГТУ, 2006. 196 с.
3. Леонтьев Н.Л. Таблицы физико-механических свойств древесных пород СССР. Технический бюллетень ЦНИИМОД №17/130. М., 1940.
4. Karlman L., Morling T., Martisson O. Wood Density, Annual Ring Width and Latewood Content in Larch and Scots Pine. Eurasian J. For. Res. 2005. Vol. 8-2. P. 91-96.
5. Ivkovic M., Washington J.G., Aljoy Abarquez, Jugollic, Michael B. Powell, Harry X. Wu. Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. Wood Sci Technol (2009) 43:237–257 DOI 10.1007/s00226-008-0232-3.
6. Longuetaud F., Mothe F., Leban J.M., Mäkelä A. Picea sapwood width: variations within and between trees. Scand J. For. Res. 2006. № 21 (1). P. 41–53. doi:10.1080/02827580500518632.
7. Lahtela V., Kärki T. Improving the UV and water-resistance properties of Scots pine (*Pinus sylvestris*) with impregnation modifiers // European Journal of Wood and Wood Products, July. 2014, Vol. 72, Is. 4. P. 445–452.
8. Butterfield B. (2006). The structure of wood: form and function. In: Walker, J.C.F., eds, Primary wood processing, 2nd edn. P. 1–22. Springer, Dordrecht.
9. Тамби А.А., Чубинский А.Н. Оценка соответствия плотности древесины требованиям к продукции деревообрабатывающих производств // Лесной журнал. 2016. № 3. С. 124–134.
10. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Хитров Е.Г., Шимкевич Ю.А., Семишкур С.О. Обоснование объемного выхода пиломатериалов для клееных деревянных конструкций на основе физических свойств древесины // Изв. С.-Петербург. гос. лесотехн. акад. 2014. № 206. С. 146–154.
11. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Хитров Е.Г., Чаузов К.В., Швец В.Л., Бахшиева М.А., Быков Д.Ю. Обоснование объемного выхода конструкционных сосновых и еловых пиломатериалов // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2016. № 214. С. 247–259.
12. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Teppoev A.V., Anan'eva N.I., Semishkur S.O., Bakhshieva M.A. Physical Nondestructive Methods for the Testing and Evaluation of the Structure of Wood Based Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. Vol. 50, № 11. P. 693–700. DOI: 10.1134/S1061830914110023.



13. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Федяев А.А., Федяева Н.Ю., Кульков А.М. Направления использования физических методов контроля структуры и свойств древесины // Системы Методы Технологии. 2015. № 2 (26). С. 152-158.

14. Юркова О.В., Никульшин С.С., Аношин Д.А., Семишкур С.О., Тамби А.А., Чубинский А.Н. Исследование прочности древесины хвойных пород ленинградской области // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: сб. науч. тр. / КГТУ. Кострома, 2015. С. 48-50.

15. Varivodina I., Kosichenko N., Varivodin V., Sedliačik J. Interconnections among the rate of growth, porosity and wood water absorption // Wood Research. 2010. № 55 (1). P. 59-66.

16. Ross R.J., Pellerin R.F. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70. Madison, WI, 1994. 40 p.

17. Samson M. Potential of finger-jointed lumber for machine stress-rated lumder grades // Forest Products Journal. 1985. № 7-8. P. 422-425.

18. Kretschmann D.E. Mechanical properties of wood. In: Wood handbook – Wood as an engineering material, chapter 5. Madison: Forest Products Laboratory. 2010.

19. Тутурин С.В. Механическая прочность древесины // Физическая мезомеханика. 2004. Вып. 6, Т. 7. С. 85-88.

20. Бахшиева М.А., Чубинский Н.А. Анализ строения и свойств ювенильной древесины на качество пиломатериалов // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2016. № 216. С. 202-214.

21. Пижурич А.А., Розенблит М.С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесн. промышленность, 1984. 232 с.

22. Хухрянский П.Н. Прочность древесины. М.: Гослесбумиздат, 1955. 152 с.

#### References

1. Ugolev B.N. Wood Science with the Basics of Commodity Science. М.: Лесн. промышленность, 2005. 366 p.

2. Volynskii V.N. Interrelation and variability of indicators of physical and mechanical properties of wood. 2-e izd. Arkhangel'sk: AGTU, 2006. 196 p.

3. Leont'ev N.L. Tables of physico-mechanical properties of tree species of the USSR. Tekhnicheskii byulleten' TsNIIMOD № 17/130. М., 1940.

4. Karlman L., Morling T., Martisson O. Wood Density, Annual Ring Width and Latewood Content in Larch and Scots Pine. Eurasian J // For. Res. 2005. Vol. 8-2. P. 91-96.

5. Ivkovic' M., Washington J.G., Aljoy Abarquez, JugoIlic, Michael B. Powell, Harry X. Wu. Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. Wood Sci Technol (2009) 43:237-257 DOI 10.1007/s00226-008-0232-3.

6. Longuetaud F., Mothe F., Leban J.M., Mäkelä A. Picea abies sapwood width: variations within and between trees. Scand // J. For. Res. 2006. № 21 (1). P. 41-53. doi:10.1080/02827580500518632.

7. Lahtela V., Kärki T. Improving the UV and water-resistance properties of Scots pine (*Pinus sylvestris*) with impreg-

nation modifiers // European Journal of Wood and Wood Products, July. 2014, Vol. 72, Is. 4. P. 445-452.

8. Butterfield B. (2006). The structure of wood: form and function. In: Walker, J.C.F., eds, Primary wood processing, 2nd edn. P. 1-22. Springer, Dordrecht.

9. Tambi A.A., Chubinskii A.N. Evaluation of the conformity of the density of wood with the requirements for the products of woodworking industries // Forest Journal. 2016. № 3. P. 124-134.

10. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Khitrov E.G., Shimkevich Yu.A., Semishkur S.O. Substantiation of bulk output of sawn timber for glued wooden structures on the basis of physical properties of wood // Izvestia SPbLTA. 2014. № 206. P. 146-154.

11. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Khitrov E.G., Chazov K.V., Shvets V.L., Bakhshieva M.A., Bykov D.Yu. Substantiation of the volume output of structural pine and spruce timbers // Izvestia SPbLTA. 2016. № 214. P. 247-259.

12. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Teppoev A.V., Anan'eva N.I., Semishkur S.O., Bakhshieva M.A. Physical Nondestructive Methods for the Testing and Evaluation of the Structure of Wood Based Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. Vol. 50, № 11. P. 693-700. DOI: 10.1134/S1061830914110023.

13. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Fedyaev A.A., Fedyaeva N.Yu., Kul'kov A.M. Directions of using physical methods for controlling the structure and properties of wood // Systems. Methods. Technologies. 2015. № 2 (26). P. 152-158.

14. Yurkova O.V., Nikul'shin S.S., Anoshin D.A., Semishkur S.O., Tambi A.A., Chubinskii A.N. Investigation of the strength of coniferous wood in the Leningrad Region // Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa: sb. nauch. tr. / KGTU. Kostroma, 2015. P. 48-50.

15. Varivodina I., Kosichenko N., Varivodin V., Sedliačik J. Interconnections among the rate of growth, porosity and wood water absorption // Wood Research. 2010. № 55 (1). P. 59-66.

16. Ross R.J., Pellerin R.F. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70. Madison, WI, 1994. 40 p.

17. Samson M. Potential of finger-jointed lumber for machine stress-rated lumder grades // Forest Products Journal. 1985. № 7-8. P. 422-425.

18. Kretschmann D.E. Mechanical properties of wood. In: Wood handbook - Wood as an engineering material, chapter 5. Madison: Forest Products Laboratory. 2010.

19. Tuturin S.V. Mechanical strength of wood // Physical Mesomechanics. 2004. Vyp. 6, T. 7. P. 85-88.

20. Bakhshieva M.A., Chubinskii N.A. Analysis of the structure and properties of juvenile wood for sawnwood quality // Izvestia SPbLTA. 2016. № 216. P. 202-214.

21. Pizhurin A.A., Rozenblit M.S. Research of woodworking processes. М.: Лесн. промышленность, 1984. 232 p.

22. Khukhryanskii P.N. Strength of wood. М.: Goslesbumizdat, 1955. 152 p.

## Исследование свойств твердых древесноволокнистых плит на основе модифицированных составов древесноволокнистой массы

И.Н. Челышева<sup>a</sup>, Н.П. Плотников<sup>b</sup>, Н.О. Балашов<sup>c</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>a</sup>irinachelysheva@yandex.ru, <sup>b</sup>n-plotnikov@mail.ru, <sup>c</sup>tdo@brstu.ru

Статья поступила 13.10.2017, принята 18.10.2017

*Производство древесноволокнистых плит (ДВП) обуславливает вовлечение в переработку низкосортной древесины и древесных отходов, не находящихся иного рационального применения. Ресурсы древесного сырья в России вполне достаточны для многократного роста отечественного производства ДВП, однако внутренний рынок для этой продукции относительно мал. Объективной перспективой является экспорт, выход на мировые рынки. Для этого продукция должна быть конкурентоспособной в отношении цены, экологичности и качества. Таким образом, повышение эффективности производства за счет вовлечения в технологию утилизируемых отходов — одна из важнейших задач, поэтому вполне своевременно и актуально использование в качестве части сырья для производства ДВП волокнодержавящих отходов целлюлозного производства — «непровара». Цель исследования заключалась в разработке технологии производства твердых ДВП с осветленным покровным слоем при использовании «непровара» вместо части древесного волокна. В результате установлена возможность осветления ДВП с увеличением степени белизны с 12 до 20 % без ухудшения физико-механических показателей плит. Определены оптимальный состав композиции древесноволокнистой массы с использованием части «непровара» и параметры режимов технологического процесса производства ДВП, обеспечивающих получение плит, соответствующих требованиям действующего стандарта (ГОСТ 4598-96). Использование «непровара» позволяет сэкономить 10–15 % сырья, а технология осветления ДВП обеспечивает расширение рынка сбыта готовой продукции.*

**Ключевые слова:** древесноволокнистая плита; «непровар»; отбеливание; математическая модель; утилизация; композиция.

## The study of solid fiberboard properties based on modified composition of wood fiber pulp

I.N. Chelysheva<sup>a</sup>, N.P. Plotnikov<sup>b</sup>, N.O. Balashov<sup>c</sup>

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup>irinachelysheva@yandex.ru, <sup>b</sup>n-plotnikov@mail.ru, <sup>c</sup>tdo@brstu.ru

Received 13.10.2017, adopted 18.10.2017

*The production of fibreboard leads to the involvement of low-grade wood and wood waste that are not being used rationally. Resources of wood raw materials in Russia are quite sufficient for multiple growth of domestic production of fiberboards but the domestic market for these products is relatively small. The objective prospect is export. But, in this case, the products must be competitive in relation to price, environmental friendliness and quality. Increasing the efficiency of production through the involvement of recyclable wastes into the technology is one of the most important tasks. Therefore, it is quite timely and relevant to use fiber-containing waste cellulose product - undercooked pulp - as a part of raw materials for fiberboard production. The purpose of the study is to develop a technology for the production of solid fiberboard with a clarified coating layer by using undercooked pulp instead of a part of wood fiber. As a result, it has been established that the fiberboard can be clarified with an increase in the degree of whiteness from 12 to 20% without worsening the physical-mechanical parameters of the fibreboard. The optimum composition of the wood fiber mass with the part of undercooked pulp and the parameters of the technological process regimes of the fiberboard production, which ensure the production meeting the requirements of the current standard (GOST 4598-96), are determined. The use of undercooked pulp can save up to 10-15% of raw materials, and the technology of lightening the fiberboard ensures the expansion of the market for the sale of finished products.*

**Keywords:** fibreboard; undercooked pulp; bleaching; mathematical model; recycling; composition.

### Введение

«Мокрый» способ производства древесноволокнистых плит (ДВП) характеризуется значительным водопотреблением и загрязнением стоков мелкими древесными волокнами, продуктами гидролиза древесины и компонентами проклеивающих составов. Сложный физико-химический состав загрязнений требует значительных затрат на эксплуатацию очистных сооружений с использованием практически всех методов очистки, при этом получаемые волокнодержавящие осадки очи-

стки промышленных стоков применяются в технологии твердых ДВП лишь ограниченно [1–4].

Утилизация производственных отходов тесно связана с возможностью снизить загрязнение биосферы, повысить эффективность производства продукции, сохранить лесные массивы [5–7].

**Общие положения. Постановка задачи исследования.** Цель исследований — совершенствование технологии получения твердых ДВП за счет замены неко-

торой части древесного волокна на «непровар» — отход целлюлозного производства.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать процесс получения ДВП с добавлением «непровара»;
- определить оптимальный расход «непровара»;
- произвести оценку влияния переменных факторов на качество ДВП и сделать выводы об оптимальных сочетаниях переменных факторов;
- разработать технологию производства ДВП с добавлением «непровара».

**Методическая часть.** Для получения образцов твердых ДВП с использованием «непровара» в качестве части сырья использовалось оборудование лаборатории завода ДВП.

Условия проведения экспериментов:

1. Степень помола — 22 ДС.
2. Концентрация волокна в волокнистой массе — 1,1–1,5 %.
3. Массовая доля связующего — 0; 0,5; 1 % к массе абсолютно сухого волокна.
4. Количество парафиновой эмульсии — 0,4; 0,8; 1,2 % к массе абсолютно сухого волокна.
5. Количество «непровара» — 10; 12,5; 15 % к массе абсолютно сухого волокна.
6. Водородный показатель  $pH = 3,9 \div 4,5$ .
7. Масса абсолютно сухого волокна в одной отливке — 233 г.
8. Толщина ДВП —  $3,2 \pm 0,3$  мм.
9. Давление подпрессовки  $P = 1$  МПа.
10. Продолжительность подпрессовки — 7 сек.
11. Температура плит горячего пресса  $T_{гр} = 190$  °С.
12. Давление прессования («отжим») — 26 МПа.
13. Давление прессования («сушка») — 4 МПа.
14. Давление прессования («закалка») — 9 МПа.
15. Время прессования (полный цикл) — 10 мин.
16. Температура в закалочной камере —  $T_{зак} = 150$  °С.
17. Время закалки — 2 ч.
18. Влажность (относительная) воздуха —  $65 \pm 5$  %.
19. Температура воздуха —  $18 \pm 2$  %.

Исходное древесное волокно определенной степени помола помещалось в специальную ванну, где после перемешивания определялась концентрация находящейся в ванне древесноволокнистой массы. Параллельно проводилось определение массовой доли «непровара», парафиновой эмульсии и фенолформальдегидной смолы. После определения количества древесного волокна на одну отливку композиция помещалась в специальную емкость, куда добавлялся «непровар» при постоянном перемешивании массы. Затем в полученную массу добавлялась вода до необходимой концентрации волокна в массе. В емкость вводилось необходимое количество фенолформальдегидной смолы, парафина и осадителя ( $H_2SO_4$ ) до определенного показателя  $pH$  [8–9].

Получившаяся масса выливалась на сетку отливной машины, разбавлялась водой в баке отливной машины, тщательно перемешивалась для равномерного распре-

деления волокна на сетке, и затем вода сливалась путем открывания клапана.

Получившаяся отливка размером 270×270 мм перемещалась на сетку, укладывалась на глянцевый лист и подпрессовывалась в холодном прессе определенное время при заданном давлении [10–12].

Получившиеся образцы прессовались в производственном горячем прессе при технологическом режиме, применяемом в производстве.

Готовые образцы после кондиционирования в течение суток распиливались согласно ГОСТ 19592-80 «Плиты древесноволокнистые. Методы испытаний»

После проведения всех испытаний твердых ДВП с использованием «непровара» в качестве части сырья для дальнейших исследований были отобраны образцы, физико-механические показатели которых соответствуют ГОСТ 4598.

Исходное древесное волокно для покровного слоя определенной степени помола помещалось в специальную ванну, где после перемешивания определялась концентрация находящейся в ванне древесноволокнистой массы.

Рассчитанное количество древесного волокна для покровного слоя на одну отливку, помещалось в специальную емкость, куда добавлялся гипохлорит натрия при постоянном перемешивании массы. Полученная масса оставлялась на 45 мин, при этом соблюдалось условие, чтобы температура древесноволокнистой массы не опускалась ниже  $50$  °С. Далее масса промывалась под теплой водой. После промывания древесноволокнистая масса возвращалась в емкость, куда добавлялась вода до необходимой концентрации волокна в массе. В емкость вводилось необходимое количество фенолформальдегидной смолы, парафина и осадителя ( $H_2SO_4$ ) до определенного показателя  $pH$ .

За время прохождения реакции осветления покровного слоя гипохлоритом натрия производилась отливка ковра основного слоя по приведенной выше технологии [13–15].

Готовые образцы после кондиционирования в течение суток распиливались согласно ГОСТ 19592-80 «Плиты древесноволокнистые. Методы испытаний».

Испытания образцов проводились в лаборатории производства ДВП ОАО «Илим-Братск ДОК» в соответствии с ГОСТ 19592-80.

Оборудование, приборы и материалы: аппарат «Дефибратор-секунда», холодный пресс, камера термообработки, сушильный шкаф, универсальная испытательная машина Р-0,5, пресс горячего прессования, лабораторные весы ВЛР-500, толщиномер, штангенциркуль, металлическая линейка, фильтровальная бумага, ионметр «рН-340», посуда лабораторная, сетки проволочные.

**Результаты исследований.** Цель исследований — разработка математической модели, описывающей процесс получения твердых ДВП с добавлением в качестве части сырья отхода целлюлозного производства — «непровара».

В качестве переменных факторов проведения эксперимента на основании предварительно проведенных

однофакторных экспериментов были приняты следующие: X1, X2, X3.

X1 — количество «непровара». В результате предварительных испытаний было выбрано оптимальное значение вводимого «непровара» в композицию плиты в количестве от 10 до 15 % к массе абсолютно сухого волокна.

X2 — количества парафина. Парафин является основным материалом для пропитки плит, придающим их гидрофобность. Небольшие дозы этого материала (около 1 %) резко повышают водостойкость плит, однако добавление большого количества парафина снижает их прочность. В связи этим добавление парафина производилось в количестве 0,4; 0,8 и 1,2 % к массе абсолютно сухого волокна.

X3 — количество упрочняющей добавки — фенолформальдегидной смолы. Фенолформальдегидная смола марки СФЖ-3013 применяется для увеличения прочности древесноволокнистой плиты. В состав композиции смолы СФЖ-3013 вводилась в соотношениях 0; 0,5 и 1 % к массе абсолютно сухого волокна.

В качестве выходных величин (Y1, Y2, Y3, Y4) были выбраны физико-механические показатели ДВП:

Y1 — предел прочности при изгибе, МПа;

Y2 — разбухание по толщине, %;

Y3 — влажность, %;

Y4 — водопоглощение лицевой поверхности, %.

Постоянные факторы эксперимента представлены в табл. 1.

Уровни варьирования переменных факторов и интервалы варьирования представлены в табл. 2

Целью экспериментального исследования является получение эмпирической математической модели объекта, т. е. отыскание зависимости каждой из выходных величин объекта от варьируемых факторов.

Проведение эксперимента осуществляется по определенному плану, в котором обозначены все возможные сочетания переменных факторов. Такой план называется матрицей планирования эксперимента. Мат-

рица планирования эксперимента по В-плану 2-го порядка представлена в натуральных и кодированных обозначениях (табл. 3).

Таблица 1

## Постоянные факторы эксперимента

Наименование	Значение
Концентрация волокна, %	2,0
Показатель концентрации ионов водорода	4,2±0,3
Масса а.с.в. в отливке, г	233
Давление подпрессовки, МПа	1,0
Температура плит пресса, °С	190
Время прессования (цикл), мин	10
Давление прессования «отжим», Мпа	5,2
Давление прессования «сушка», Мпа	1,2
Давление прессования «закалка», Мпа	2,5
Влажность (относительная) воздуха, %	65±5
Температура воздуха, °С	18 ±2

Таблица 2

## Переменные факторы и уровни их варьирования

Факторы	Уровень обозначения	«непровар»	парафин	СФЖ-3013
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Базовый уровень	0	12,5	0,8	0,5
Интервал варьирования	ΔX <sub>i</sub>	2,5	0,4	0,5
Верхний уровень	+	15	1,2	1,0
Нижний уровень	-	10	0,4	0

Таблица 3

## Матрица планирования

№ опыта	Количество «непровара»	Количество парафина	Количество СФЖ-3013	X <sub>1</sub> , %	X <sub>2</sub> , %	X <sub>3</sub> , %
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>			
1	-1	-1	-1	10	0,4	0
2	+1	-1	-1	15	0,4	0
3	-1	+1	-1	10	1,2	0
4	+1	+1	-1	15	1,2	0
5	-1	-1	+1	10	0,4	1
6	+1	-1	+1	15	0,4	1
7	-1	+1	+1	10	1,2	1
8	+1	+1	+1	15	1,2	1
9	-1	0	0	10	0,8	0,5
10	+1	0	0	15	0,8	0,5
11	0	-1	0	12,5	0,4	0,5
12	0	+1	0	12,5	1,2	0,5
13	0	0	-1	12,5	0,8	0
14	0	0	+1	12,5	0,8	1



В результате испытаний были получены следующие средние значения физико-механических показателей образцов ДВП (табл. 4).

Таблица 4

Результаты физико-механических показателей ДВП

№ опыта	Наименование показателя			
	Предел прочности при изгибе, МПа	Водопоглощение лицевой поверхности, %	Разбухание по толщине, %	Влажность, %
1	33,40	14,40	22,80	4,82
2	32,90	16,82	27,10	6,20
3	33,00	13,90	23,20	4,70
4	32,90	16,70	27,00	6,23
5	35,80	12,60	22,10	5,80
6	33,80	16,30	28,00	6,71
7	35,80	12,50	23,10	5,88
8	34,60	15,88	28,80	6,80
9	35,20	13,00	20,20	5,51
10	33,09	16,40	27,80	6,05
11	34,60	15,69	24,60	5,80
12	34,25	15,29	23,50	5,88
13	34,70	16,39	23,40	5,10
14	35,80	14,99	23,20	6,00

Требования физико-механических показателей по ГОСТ 4598 для плит марок Т, Т-П, Т-С, Т-СП представлены в табл. 5.

Таблица 5

Требования физико-механических показателей ДВП

Наименование показателя	Норма для плит марок Т, Т-П, Т-С, Т-СП	
	Группа А	Группа Б
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	850 – 1 100	800 – 1 100
Предел прочности при изгибе, МПа, нижняя граница, Тн	38	33

Разбухание по толщине за 24 часа, %, верхняя граница, Тв	20	23
Влажность, %:		
– нижняя граница Тн	4	4
– верхняя граница Тв, не более	10	10
Водопоглощение за 2 часа, %, верхняя граница, Тв	Не нормируется	
Водопоглощение лицевой поверхности за 24 часа, %, Тв	11	13
Предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти, МПа, Тн	0,30	–

По полученным данным была построена математическая модель, описывающая влияние переменных факторов на прочность при изгибе твердых ДВП:

$$y = 34,88 - 0,6x_1 + 0,89x_3 - 0,32x_1x_3 - 0,77x_1^2 - 0,44x_2^2 + 0,380x_3^2.$$

Проведенные исследования показывают, что наибольшее влияние на прочность ДВП оказало количество вводимого «непровара» и упрочняющей добавки — фенолформальдегидной смолы.

По полученным уравнениям регрессии были построены графические зависимости (рис. 1–3).

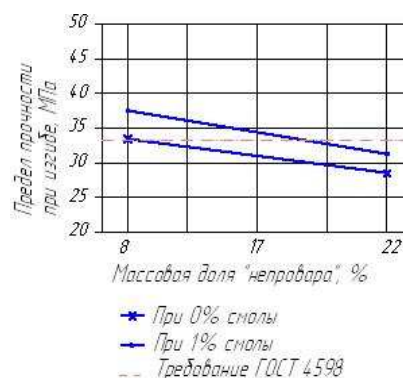


Рис. 1. Зависимость предела прочности ДВП при изгибе от содержания «непровара»

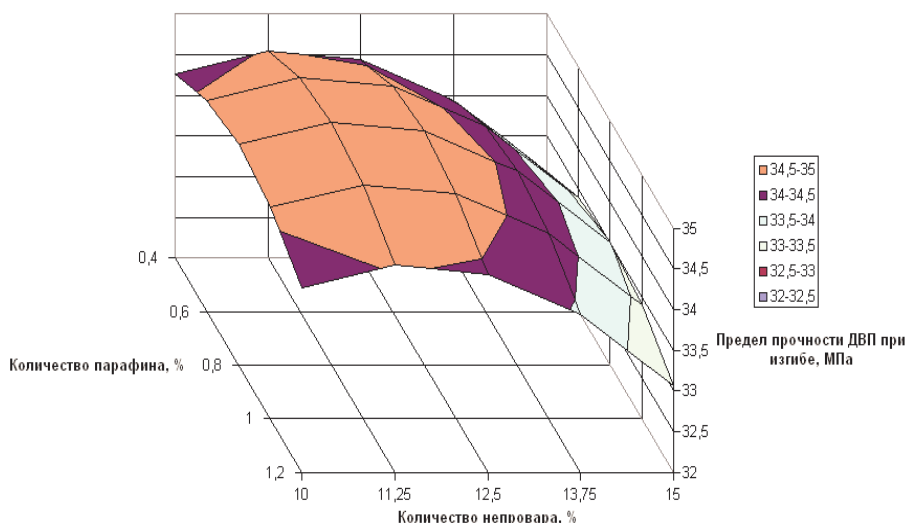


Рис. 2. Зависимость предела прочности ДВП при изгибе от количества «непровара» и парафина, вводимых в состав композиции

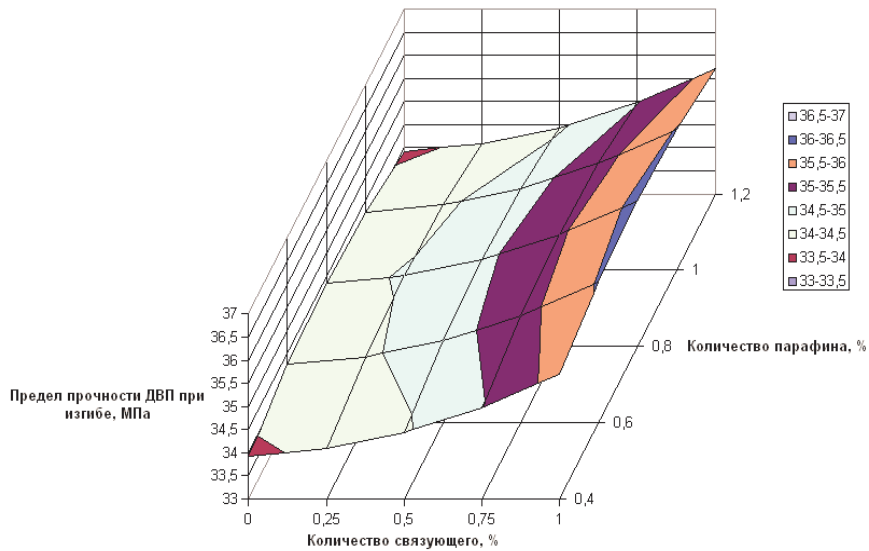


Рис. 3. Зависимость предела прочности ДВП при изгибе от количества вводимых парафина и связующего

На основании представленных графических зависимостей можно сделать следующие выводы:

- увеличение содержания «непровара» уменьшает прочность ДВП при изгибе, что обусловлено делигнификацией «непровара»;
- увеличение содержания связующего и парафина способствует увеличению прочности.

Наибольшее влияние на прочность при изгибе оказывает содержание «непровара» и связующего. Для получения качественных ДВП рекомендуется добавлять 1 % связующего, 0,8 % парафина и не более 14 % «непровара».

На следующем этапе были проведены исследования влияния переменных факторов на водопоглощение лицевой поверхности ДВП. Математическая модель, описывающая это влияние, имеет вид:

$$y = 15,49 + 1,57 x_1 - 0,59 x_3 + 0,23 x_1 x_3 - 0,79 x_1^2.$$

Из данного регрессионного уравнения следует, что наибольшее влияние на водопоглощение оказало количество вводимого «непровара».

По полученным уравнениям регрессии были построены графические зависимости (рис. 4, 5).

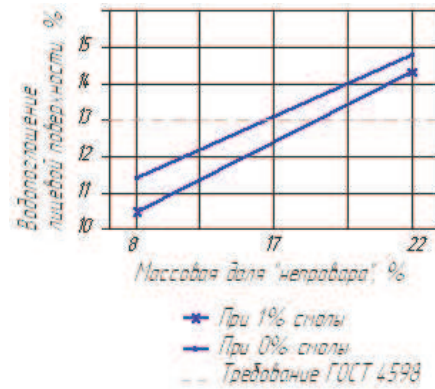


Рис. 4. Зависимость водопоглощения лицевой поверхности ДВП от содержания «непровара»

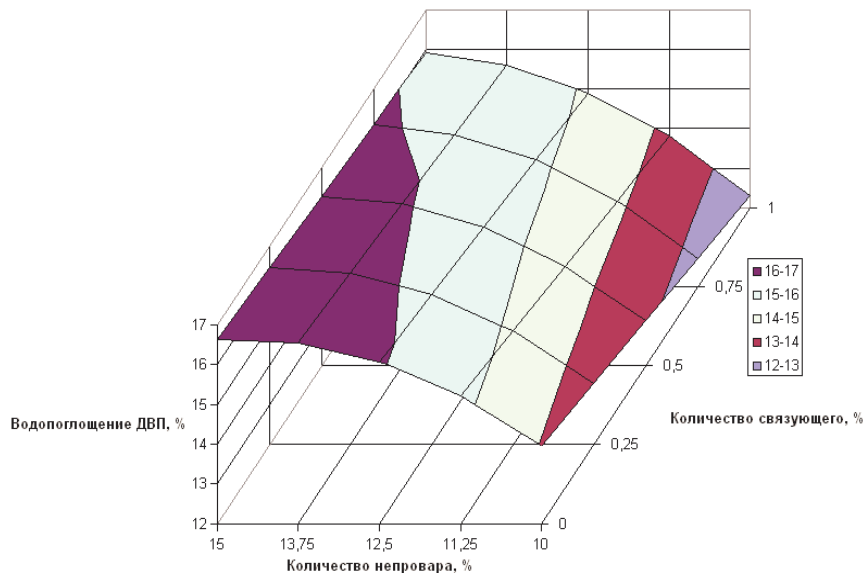


Рис. 5. Зависимость водопоглощения лицевой поверхности ДВП от количества «непровара» и связующего



Из графических зависимостей, представленных на рис. 4 и 5, можно сделать следующие выводы.

«Непровар» оказал наибольшее влияние на водопоглощение лицевой поверхности ДВП. При увеличении содержания «непровара» водопоглощение резко возрастает. Наличие связующего в композиции способствует уменьшению водопоглощения. Для получения качественных ДВП рекомендуется вводить в состав композиции 1 % связующего; 0,8 % парафина и не более 12 % «непровара».

Математическая модель, описывающая влияние переменных факторов на разбухание ДВП по толщине, имеет следующий вид:

$$y = 23,047 + 2,73 x_1 + 0,43 x_1 x_3 + 0,96 x_1^2 + 1,01 x_2^2.$$

Из данного регрессионного уравнения следует, что наибольшее влияние на разбухание ДВП оказывает количество вводимого «непровара» и парафина.

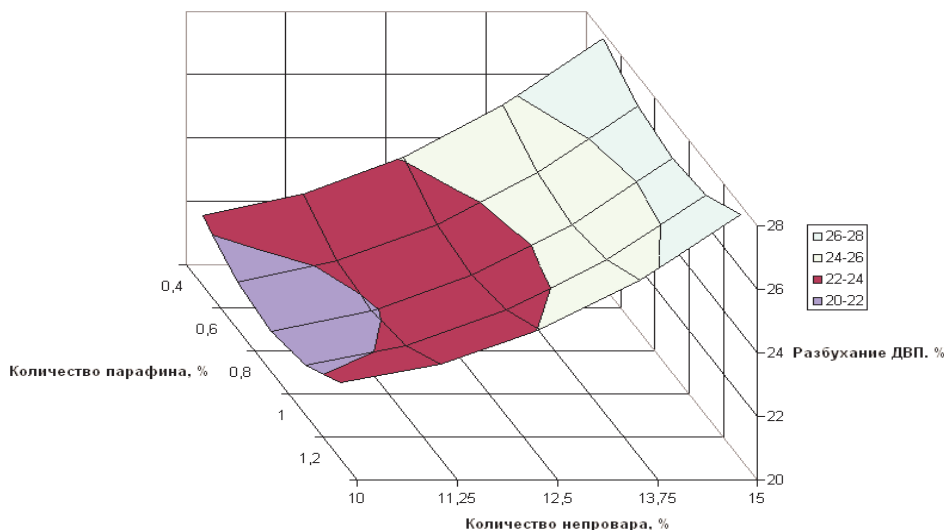


Рис. 7. Зависимость разбухания ДВП по толщине от количества вводимых «непровара» и парафина

Из графических зависимостей, представленных на рис. 6 и 7, можно сделать следующие выводы.

Наибольшее влияние на разбухание по толщине оказывает содержание «непровара» и парафина.

При увеличении содержания «непровара» разбухание резко возрастает, тогда как наличие парафина в композиции способствует уменьшению значений. Для получения качественных ДВП рекомендуется добавлять 1 % парафина, 1 % связующего и не более 13 % «непровара».

На следующем этапе были проведены исследования образцов ДВП с оптимальными физико-механическими показателями с заменой в основном слое части древесного волокна «непроваром», а в покровном слое с добавлением отбеливателя — гипохлорита натрия (NaClO).

В качестве образца с оптимальными значениями была взята плита со следующим составом композиции:

- количество «непровара» — 12,5 %;
- количество парафина — 0,8 %;
- количество связующего — 1 %;

По полученным уравнениям регрессии были построены графические зависимости, представленные на рис. 6, 7.

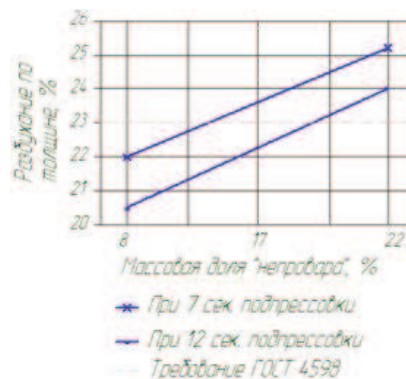


Рис. 6. Зависимость разбухания ДВП по толщине от содержания «непровара» в составе композиции

– введение в покровный слой 1,5 % к массе абсолютно сухого волокна отбеливателя — гипохлорита натрия.

Физико-механические показатели образца, взятого для дальнейших исследований приведены в табл. 6.

Таблица 6  
Физико-механические показатели

Наименование показателя	Значение
Предел прочности при изгибе, МПа	34,7
Водопоглощение лицевой поверхностью, %	16,39
Разбухание по толщине, %	23,4
Влажность, %	5,10

Для получения более точных значений были изготовлены три образца и проведены испытания ДВП с добавлением в покровный слой отбеливателя — гипохлорита натрия. Результаты исследований занесены в табл. 7.

Таблица 7

## Результаты исследований

№ опыта	Наименование физико-механических показателей			
	Предел прочности при изгибе, МПа	Водопоглощение лицевой поверхностью, %	Разбухание по толщине, %	Влажность, %
1	34,47	16,62	23,71	5,69
2	34,29	16,78	23,83	5,58
3	34,00	16,90	23,94	5,97

Далее полученные образцы исследовались на степень белизны в лаборатории целлюлозного завода. Прибором для определения степени белизны образцов послужила автоматическая установка Elrepho с программным управлением, допускающая погрешность не более 0,1 %.

Сравнение степени белизны полученных образцов с исходным материалом дало следующие результаты (табл. 8).

Таблица 8

## Результаты исследования образцов ДВП на степень белизны, %

Образец без гипохлорита натрия	Образцы с гипохлоритом натрия
12	20
	20
	20

## Выводы

1. В результате проведенных исследований была установлена возможность замены части древесного волокна на «непровар» в составе композиции при производстве древесноволокнистых плит.

Оптимальное количество «непровара», вводимого в композицию, составляет 12–14 %. Дальнейшее увеличение ведет к снижению качественных показателей плит.

2. В результате исследований установлено, что добавление 1,5 % гипохлорита натрия при продолжительности реакции в 45 мин будет являться оптимальным для получения твердых ДВП с осветленным покровным слоем со степенью белизны 20 %.

3. Определено, что все параметры плит, полученных в результате исследований, соответствуют требованиям ГОСТ 4598-86, из чего следует, что обработка волокна гипохлоритом натрия не ухудшает физико-механических показателей древесноволокнистых плит.

4. Степень белизны полученных образцов (20 %) намного превосходит аналогичный показатель исходного образца (12 %) без ухудшения физико-механических показателей.

5. Полученные образцы ДВП по физико-механическим показателям ГОСТ 4598-86 соответствуют марке Т-С группы Б.

## Литература

1. Плотников Н.П., Денисов С.В. Оптимизация технологических режимов склеивания фанеры модифицированными

клеевыми композициями // Вестн. КрасГАУ. 2010. Вып. 5. С. 143-148.

2. Плотников Н.П., Плотникова Г.П. Совершенствование технологии производства древесноплитных материалов. Новосибирск: НП «СибАК», 2013. 112 с.

3. Плотников Н.П., Симикина А.А. Снижение токсичности карбамидоформальдегидных смол // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 6. С. 155-158.

4. Симикина А.А., Чельшева И.Н., Плотников Н.П. Применение лигнина в производстве древесно-полимерных композитов // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 1. С. 162-169.

5. Чельшева И.Н., Балашов Н.О. Исследование некоторых свойств древесноволокнистых композиций // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2011. Т.2. С. 236-239.

6. Чельшева И.Н. Совершенствование технологии производства твердых древесноволокнистых плит повышенной водостойкости: дис.... канд. техн. наук. Братск, 2007. 152 с.

7. Плотникова Г.П., Плотников Н.П., Аксютенкова Н.Ю. Исследование физико-химических свойств двухкомпонентных лакокрасочных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 14 (20). С. 129-133.

8. Чельшева И.Н., Денисов С.В. Повышение эффективности производства древесноволокнистых плит // Дизайн и производство мебели. 2005. № 2. С. 49-54.

9. Ребрин С.П., Мерсов Е.Д. Производство древесноволокнистых плит. М.: Лесн. промышленность, 1982.

10. Дроздов И.Я. Производство древесноволокнистых плит. М.: Высш. школа, 1979.

11. Пижурич А.А., Розенблит М.С. Исследование процессов деревообработки. М.: Лесн. промышленность, 1984.

12. Технологический регламент ПДВП "ИлимБратск-ДОК". Братск: БЛПК, 2008.

13. Денисов С.В., Чельшева И.Н., Варанкина Г.С. Утилизация отходов в производстве твердых древесноволокнистых плит // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. / БГИТА. Брянск, 2001. Вып. 4.

14. Денисов С.В., Чельшева И.Н. Проблема комплексного использования сырья в производстве древесноволокнистых плит // Труды Братского государственного технического университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2004. Т. 2. С. 200-204.

15. Бекетов В.Д. Повышение эффективности производства древесноволокнистых плит. М.: Лесн. промышленность, 1998. 160 с.

## References

1. Plotnikov N.P., Denisov S.V. Optimization of technological modes of bonding of plywood adhesive compositions modified // The Bulletin of KrasGAU. 2010. Vyp. 5. P. 143-148.

2. Plotnikov N.P., Plotnikova G.P. Improvement of production technology wood-plates materials. Novosibirsk: NP «SibAK», 2013. 112 p.

3. Plotnikov N.P., Simikova A.A. Decrease the toxicity of urea-formaldehyde resins // The Bulletin of KrasGAU. 2010. № 6. P. 155-158.

4. Simikova A.A., Chelysheva I.N., Plotnikov N.P. The use of lignin in the production of wood-plastic composites // The Bulletin of KrasGAU. 2013. № 1. P. 162-169.

5. Chelysheva I.N., Balashov N.O. A study of some properties of wood-fiber compositions // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2011. T.2. P. 236-239.

6. Chelysheva I.N. Improvement of technology of production of solid wood-fiber plates with the water-resistant: dis.... kand. tekhn. nauk. Bratsk, 2007. 152 p.

7. Plotnikova G.P., Plotnikov N.P., Aksyutenkova N.Yu., Acutchenkova N.Yu. Study of physico-chemical properties of two component paint materials // Systems. Methods. Technologies. 2013. № 14 (20). P. 129-133.
8. Chelysheva I.N., Denisov S.V. Improving the efficiency of production of fibreboard // Design and manufacture of furniture. 2005. № 2. P. 49-54.
9. Rebrin S.P., Mersov E.D. Production of fibreboard. M.: Lesn. promyshlennost', 1982.
10. Drozdov I.Ya. Production of fibreboard. M.: Vyssh. shkola, 1979.
11. Pizhurin A.A., Rozenblit M.S. Study of the processes of woodworking. M.: Lesn. promyshlennost', 1984.
12. Technological regulations PDVP «ПимBratskDOK». Bratsk: BLPK, 2008.
13. Denisov S.V., Chelysheva I.N., Varankina G.S. Utilization of waste in the production of solid wood-fiber plates // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa: sb. nauch. tr. / BGITA. Bryansk, 2001. Vyp. 4.
14. Denisov S.V., Chelysheva I.N. The problem of complex use of raw materials in the production of wood-fiber plates // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. 2004. T. 2. P. 200-204.
15. Beketov V.D. Improving the efficiency of production of fibreboard. M.: Lesn. promyshlennost', 1998. 160 p.

УДК 674

DOI: 10.18324/2077-5415-2017-4-169-175

## Разработка состава клеевой композиции для соединения массивной древесины в условиях Сибири

Г.П. Плотникова<sup>a</sup>, С.Х. Симонян<sup>b</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия  
<sup>a</sup>galina.pavlovna.plotnikova@yandex.ru, <sup>b</sup>simon.helokovich.simonyan@gmail.com  
Статья поступила 20.08.2017, принята 29.09. 2017

*Возрастающая популярность деревянного домостроения объясняется прежде всего использованием древесины — экологически чистого материала с приятной на ощупь поверхностью, создающего благоприятную атмосферу внутри помещения. Деревянное домостроение в условиях Сибири все чаще подразумевает применение клеевой массивной древесины — CLT-панелей, BSP, X-lam, клееного стенового бруса. Клеевые деревянные конструкции должны соответствовать требованиям ГОСТ 20850-2014 «Конструкции деревянные клеенные несущие», базирующегося на стандарте EN 14080:2005. Достаточную тепло- и морозостойкость склеенных панелей обеспечивают клеи поликонденсационного и полимеризационного типов: C3, D3, C4, D4 по EN 204. Согласно ГОСТ 20850-2014 и EN 14080:2005 разрешены к использованию эмульсия полимер-изоцианата (EPI), резорциноформальдегидные клеи (RF), меламино-мочевино-формальдегидные клеи (MUF, MF), полиуретановые клеи (PUR). В России полиуретановые PUR-клеи не допускаются для производства клееных деревянных конструкций даже в малоэтажном домостроении, а в Европе не применяют эмульсию полимер-изоцианатов EPI. Резорциноформальдегидные клеевые системы используются сегодня в очень редких случаях, так как образуют стойкий к воздействию химических агрессивных соединений клеевой шов черного цвета. Исходя из вышесказанного, чтобы обеспечить бесцветный клеевой шов, можно использовать PUR-клеи, MUF, MF-клеи, но они довольно дороги. Поливинил-ацетаты (PVA), как и мочевино-формальдегидные клеи (UF), являются относительно дешевыми общедоступными клеями, но по причине необходимости обеспечения определенного класса ответственности конструкций они не допускаются к производству клееных деревянных строительных изделий. Запрет объясняется самой природой создаваемого ими химического соединения, его неспособностью нести длительную статическую нагрузку. Поэтому актуальным и своевременным представляется поиск модификаторов для недорогих клеевых составов, которые смогут обеспечивать необходимые показатели прочностных свойств клеевых соединений и, главное, тепло-, водо- и морозостойкость.*

**Ключевые слова:** ламели; клеи; модификация; прочность; теплостойкость; морозостойкость; водостойкость.

## Development of the adhesive composition for joining solid wood in the conditions of Siberia

G.P. Plotnikova<sup>a</sup>, S.H. Simonyan<sup>b</sup>

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia  
<sup>a</sup>galina.pavlovna.plotnikova@yandex.ru, <sup>b</sup>simon.helokovich.simonyan@gmail.com  
Received 20.08.2017, accepted 29.09.2017

*Increasing popularity of wooden housing construction is due primarily to the use of wood - an environmentally friendly material with a pleasant to the touch surface, creating a favorable atmosphere inside the room. Wooden housing construction in Siberia means*

the use of glued massive wood: CLT-panels, BSP, X-lam, glued wall beam. Glued wooden structures must comply with the requirements of GOST 20850-2014 "Wooden glued bearing structures", based on the standard EN 14080: 2005. Sufficient heat and frost resistance of the glued panels is provided by glues of polycondensation and polymerization types: C3, D3, C4, D4 to EN 204. According to GOST 20850-2014 and EN 14080: 2005, a polymer-isocyanate (EPI) emulsion, resorcinol-formaldehyde adhesives (RF), melamine-urea-formaldehyde adhesives (MUF, MF), polyurethane adhesives (PUR) are allowed in construction. In Russia, polyurethane PUR-adhesives can't be used in the production of glued wooden structures, even in low-rise housing construction, and in Europe EPI emulsion is not allowed for production. Resorcinol-formaldehyde glutinous systems are used today in very rare cases, since they form a glue line of black color, resistant to chemical aggressive compounds. Thus, to provide a colorless glue seam, it is possible to use PUR-adhesives, MUF, MF-adhesives, but they are quite expensive. Polyvinyl acetates (PVA), like urea-formaldehyde glues (UF), are relatively inexpensive public adhesives, but due to the need to provide a certain class of structural responsibility, they can't be used in glued wooden construction products. The prohibition is explained by the nature of the chemical compound created by them and their inability to carry a prolonged static load. Therefore, it is timely to search for modifiers for inexpensive adhesive compositions that will be able to provide the necessary indices of strength properties of glue joints and, most importantly, heat, water and frost resistance.

**Keywords:** lamellae; glues; modification; durability; heat resistance; frost resistance; water resistance.

### Введение

Исследования посвящены решению актуальной научной задачи повышения эффективности технологии склеивания массивной древесины для деревянного домостроения в условиях Сибири путем сокращения стоимости клееных деревянных конструкций без снижения прочностных характеристик композиций.

С целью обеспечения требований по тепло-, морозо- и водостойкости в качестве модификатора клеевого состава был предложен отход — пропитанный кислотой твердый остаток гидролиза древесины, гидролизный лигнин. Содержание этого отхода на полигонах исчисляется сегодня уже миллионами тонн (в Красноярском крае и Иркутской области насчитывается порядка 4 млн т гидролизного лигнина). Под лигнин занимают большие земельные участки, загрязняются воздух и территории, прилегающие к свалкам, при длительном хранении лигнин самовозгорается. Все это наносит серьезный экологический и экономический ущерб окружающему миру.

Технический гидролизный лигнин представляет собой аморфное порошкообразное вещество с плотностью 1,25–1,45 г/см<sup>3</sup>, от светло-кремового до темно-коричневого цвета, со специфическим запахом, молекулярная масса 5 000 – 10 000, размеры частиц лигнина — от нескольких миллиметров до микронов (и меньше). При повышенных давлении и температуре, особенно во влажном состоянии, лигнин проявляет пластические свойства. Обладая свойствами фенола и резорцина, лигнин способен модифицировать клеи, улучшая их химическую и атмосферостойкость [1–2].

Лигнин склонен к реакциям сшивания цепей, которые принято называть реакциями «конденсации», причем эти реакции могут идти как в кислой, так и в щелочной среде. Реакции конденсации сопровождаются образованием новых углерод-углеродных связей, что приводит к увеличению молекулярной массы и значительному изменению его химического строения. В составе лигнина содержатся метоксильные (–OCH<sub>3</sub>), гидроксильные (–OH) как фенольные, так и алифатические (спиртовые) группы, карбонильные (C=O) и хинонные группы, образующиеся при окислении, карбоксильные группы (–COOH), при этом лигнин достаточно инертен.

В связи с вышеизложенным, поиск «активаторов» лигнина также представляется актуальной и значимой задачей.

Целью исследований является совершенствование технологии склеивания массивной древесины для деревянного домостроения в условиях Сибири путем сокращения стоимости клееных деревянных конструкций без снижения качества композиций, осуществляемое за счет модификации клеев.

Вопросам склеивания посвящен ряд исследований таких ученых, как Г.С. Варанкина, В.Н. Вольнский, В.И. Азаров, В.Е. Цветков. Вовлечение отходов в производство рассматривалось в различных источниках [3–9], создание двухкомпонентных систем представлено в работах [10–15].

**Методика исследования.** В качестве метода получения описания процесса изготовления клееных деревянных конструкций (КДК) принят активный эксперимент. Функцией отклика такой модели являются режим изготовления КДК и основные показатели свойств.

Выходные величины были обозначены качественными показателями готовой продукции:

$Y_1$  — предел прочности КДК при скалывании по клеевому слою ( $\tau$ ), МПа, ГОСТ 15613.1;

$Y_2$  — морозостойкость КДК, %, ГОСТ 18446;

$Y_3$  — теплостойкость КДК, %, ГОСТ 18446;

$Y_4$  — расслаивание КДК (Р), %, ГОСТ 27812-2005.

Были апробированы различные способы «активации» гидролизного лигнина:

для мочевино-формальдегидного клея:

– поливинилацетатной эмульсией (ПВА);

– раствором мочевины 40 %;

для поливинилацетатной эмульсии (ПВА):

– токами сверхвысокой частоты;

– термической активацией при  $t = 100$  °С;

– раствором мочевины 40 %.

Основной характеристикой качества клеевого соединения, которая должна постоянно фиксироваться в ходе производственного контроля, является прочность соединения при скалывании по клеевому слою.

На рис. 1 представлены гистограмма зависимости скалывания по клеевому слою ламелей массивной древесины и показателей тепло- и морозостойкости от вида модификатора.



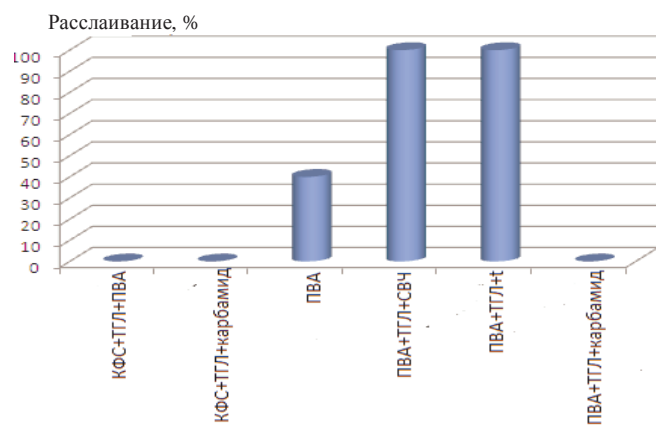


**Рис. 1.** Гистограмма зависимости скалывания по клеевому слою ламелей массивной древесины и показателей тепло- и морозостойкости от вида модификатора: *ряд 1* — испытания на скалывание по клеевому слою; *ряд 2* — испытания на скалывание по клеевому слою после определения теплостойкости; *ряд 3* — испытания на скалывание по клеевому слою после определения морозостойкости

Анализируя гистограмму, можно сделать вывод о целесообразности «активации» гидролизного лигнина поливинилацетатом и раствором карбамида 40 %. Испытания на скалывание по клеевому слою показывают также необходимую морозо- и теплостойкость.

Карбамид — достаточный «активатор» лигнина на химическом уровне: активный водород амидной NH<sub>2</sub> группы карбамида, взаимодействуя с гидроксильными ОН группами (алифатическими, ароматическими) и карбоксильными СООН группами лигнина, образует реакционноспособные метилольные группы.

На рис. 2 представлена гистограмма зависимости расслаивания ламелей склеенной массивной древесины после циклических испытаний (вымачивание – сушка). Испытания на расслаивание в России выполняются по ГОСТ 27812, который соответствует EN391 «Клееная массивная древесина. Испытания клеевых швов на расслаивание». Метод предусматривает интенсивное увлажнение и последующее интенсивное высушивание торцовых срезов многослойного элемента до исходного веса.

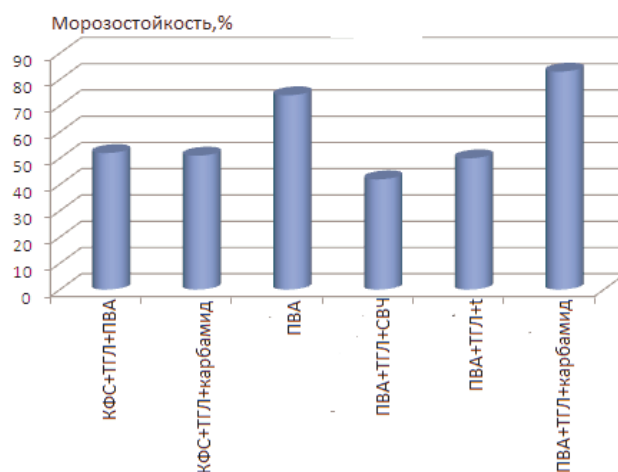


**Рис. 2.** Гистограмма зависимости расслаивания ламелей склеенной массивной древесины после циклических испытаний (вымачивание – сушка)

Анализируя гистограмму, можно сделать вывод о том, что циклическим испытаниям на расслаивание (вымачивание – сушка) противостоят образцы следующего состава:

- КФС+ТГЛ, активированный ПВА;
- КФС+ТГЛ, активированный раствором карбамида;
- ПВА+ТГЛ, активированный раствором карбамида 40 %.

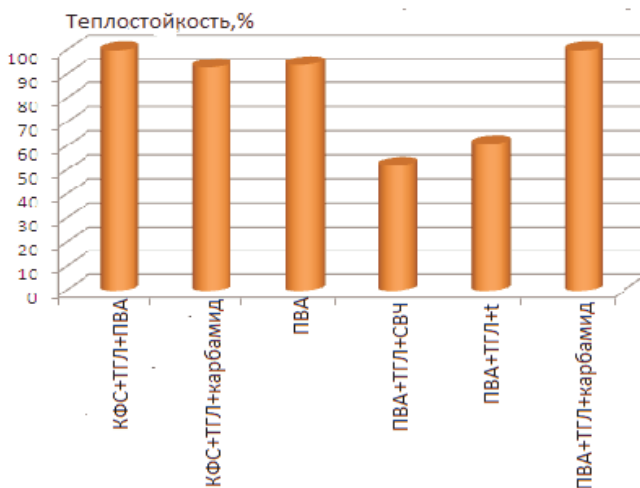
На рис. 3 представлена гистограмма зависимости морозостойкости ламелей склеенной массивной древесины от модификатора.



**Рис. 3.** Гистограмма зависимости морозостойкости ламелей склеенной массивной древесины от модификатора

Анализируя гистограмму, можно увидеть, что наиболее высокой морозостойкостью (испытания на скалывание после выдержки при t = -40 °C и влажности 65 % в течение 2-х недель) обладают полимеризационные клеи, в частности полимер винилацетата, но при этом модифицированный ПВА лигнином с активацией его карбамидом имеет более высокий показатель морозостойкости.

На рис. 4 представлена гистограмма зависимости теплостойкости (испытания на скалывание после выдержки при t = +60 °C и влажности 65 % в течение 2-х недель) ламелей склеенной массивной древесины от модификатора.



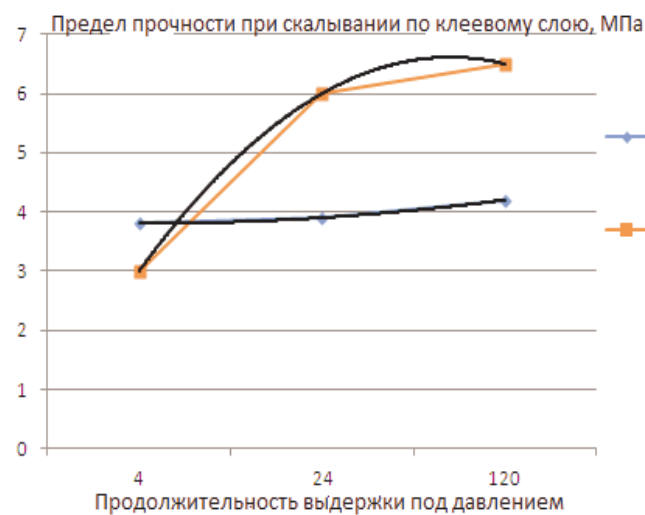
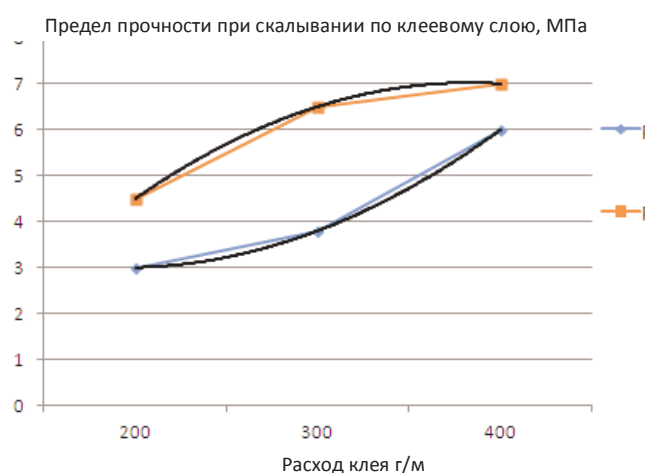
**Рис. 4.** Гистограмма зависимости теплостойкости ламелей склеенной массивной древесины от модификатора

Анализируя гистограмму, можно увидеть, что самой высокой теплостойкостью, 100 %, обладают клеевые композиции составов:

- КФС, модифицированная ТГЛ, активированным ПВА;
- ПВА, модифицированный ТГЛ, активированным раствором карбамидом 40 %.

На рис. 5 показана зависимость прочности при скалывании по клеевому слою КДК от расхода клея (а) и продолжительности выдержки под давлением в холодном прессе (б).

На рис. 6 показана зависимость морозостойкости клеевых соединений КДК от расхода клея (а) и продолжительности выдержки под давлением (б).

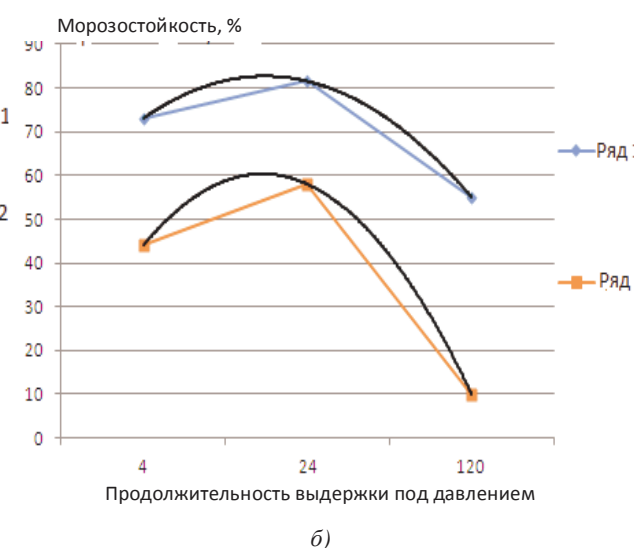
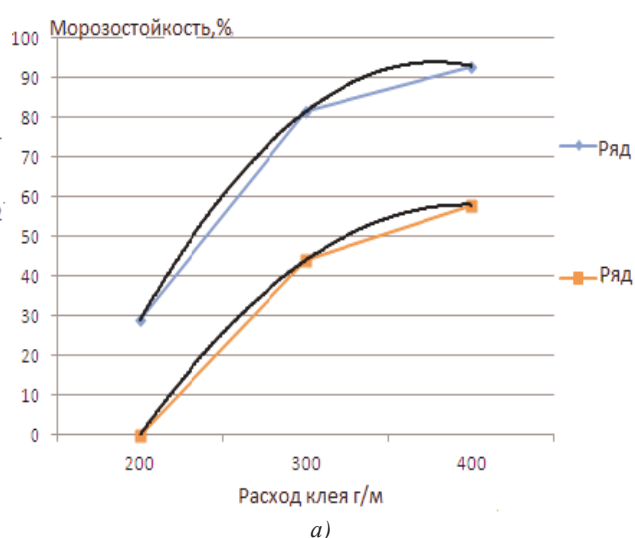


**Рис. 5.** Зависимость прочности при скалывании по клеевому слою КДК от расхода клея (а) и продолжительности выдержки под давлением (б): ряд 1 — ПВА+ТГЛ, активированный раствором карбамидом 40 %; ряд 2 — КФС+ТГЛ, активированный раствором карбамидом 40 %

На рис. 7 показана зависимость теплостойкости клеевых соединений КДК от расхода клея (а) и продолжительности выдержки под давлением (б).

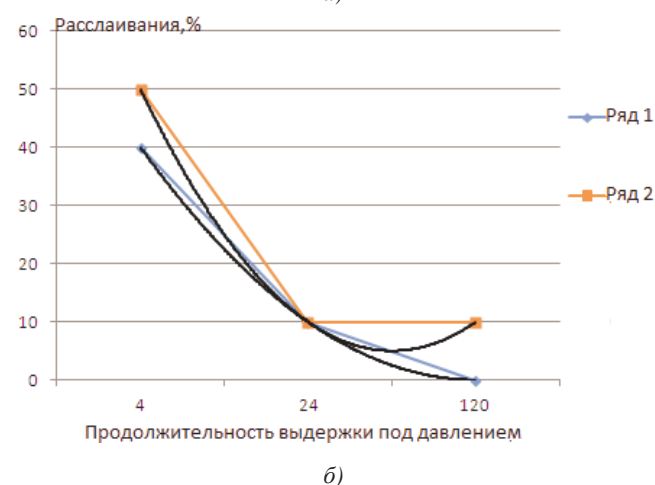
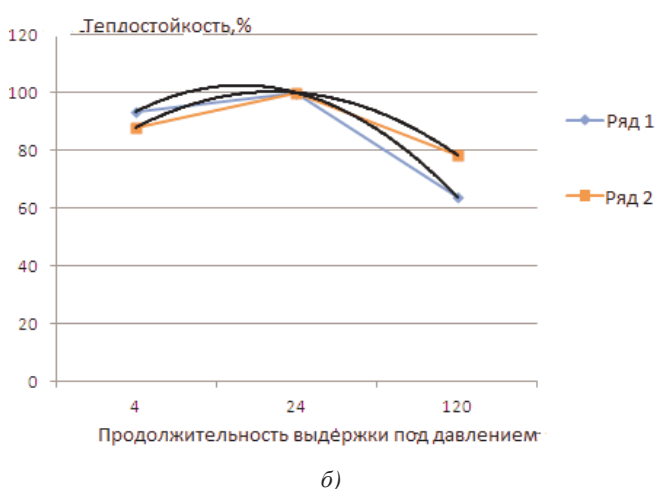
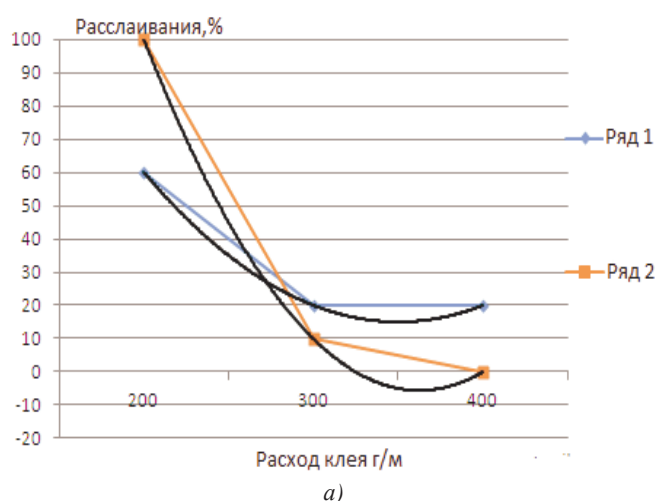
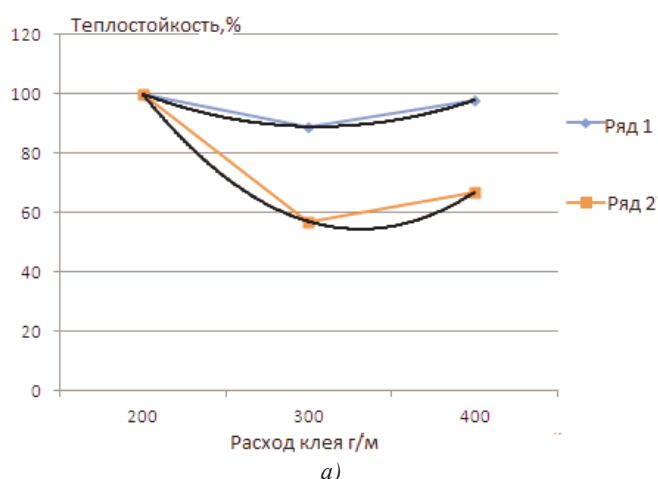
На рис. 8 показана зависимость расслаивания клеевых соединений КДК от расхода клея (а) и продолжительности выдержки под давлением (б).

Анализируя полученные зависимости, можно увидеть, что наилучшими показателями прочности, морозо- и теплостойкости, стойкости к расслаиванию обладают клеевые системы ПВА, модифицированные ТГЛ, активированным раствором карбамидом 40 %. Модифицированный ПВА не теряет прочности при длительной циклической нагрузке при его расходе 300–400 г/м<sup>2</sup> и продолжительности выдержки клеевого соединения под давлением не менее суток.



**Рис. 6.** Зависимость морозостойкости клеевых соединений КДК от расхода клея (а) и продолжительности выдержки под давлением (б): ряд 1 — ПВА+ТГЛ, активированный раствором карбамидом 40 %; ряд 2 — КФС+ТГЛ, активированный раствором карбамидом 40 %





**Рис. 7.** Зависимость теплостойкости клеевых соединений КДК от расхода клея (а) и продолжительности выдержки под давлением (б): *ряд 1* — ПВА+ТГЛ, активированный раствором карбамида 40 %; *ряд 2* — КФС+ТГЛ, активированный раствором карбамида 40 %

**Рис. 8.** Зависимость расслаивания клеевых соединений КДК от расхода клея (а) и продолжительности выдержки под давлением (б): *ряд 1* — ПВА+ТГЛ, активированный раствором карбамида 40 %; *ряд 2* — КФС+ТГЛ, активированный раствором карбамида 40 %

Математическое описание зависимости предела прочности КДК при скалывании по клеевому слою от варьируемых технологических параметров представлено в виде уравнения регрессии:

$$Y_1 = 6,2 - 0,75X_1 + 0,45X_2 + 0,37X_3 - 0,75X_1^2 + 0,15X_2^2 - 0,05X_3^2 - 1,2X_1 \cdot X_2 - 0,26X_1 \cdot X_3$$

Математическое описание зависимости расслаивания ламелей склеенной массивной древесины после циклических испытаний (вымачивание – сушка) представлено в виде уравнения регрессии:

$$Y_2 = 52,3 - 15,1X_1 - 12,3X_2 - 6,7X_3 + 8,5X_1^2 + 3,5X_2^2 + 9X_3^2 + 2,9X_1 \cdot X_2 - 10,8X_1X_3 + 1X_2X_3$$

Математическое описание зависимости морозостойкости ламелей склеенной массивной древесины от модификатора варьируемых технологических параметров представлено в виде уравнения регрессии:

$$Y_3 = 84,4 + 9,6X_1 + 3,8X_2 - 0,3X_3 + 6,3X_1^2 + 6,8X_2^2 - 7,7X_3^2 + 1,88X_1 \cdot X_2 - 1,76X_1X_3 - 2X_2X_3$$

Математическое описание зависимости морозостойкости ламелей склеенной массивной древесины от модификатора варьируемых технологических параметров представлено в виде уравнения регрессии:

$$Y_4 = 9,3 + 7,5X_1 + 12,6X_2 - 6,6X_3 + 0,7X_1^2 + 10,8X_2^2 + 4,3X_3^2 + 5,4X_1 \cdot X_2 + 0,25X_1X_3 - 0,25X_2X_3$$

В результате экспериментальных исследований подтверждены основные теоретические предпосылки о более высокой когезионной прочности системы, содержащей группы с высокой энергией взаимодействия, имеющейся в ТГЛ (-ОН, -СООН). Наличие в лигнине групп с высокой энергией взаимодействия повышает когезионную прочность системы и повышает атмосферостойкость клеевых соединений КДК на химическом уровне [17-18].

На основании комплексной оценки влияния управляемых факторов [19] на качественные показатели КДК, сформулированы рекомендации:

- для производства КДК возможно использовать ПВА-системы, модифицированные гидролизным лигнином ТГЛ, активированным раствором карбамида 40%;
- расход клеевой композиции должен составлять 300-400 г/м<sup>2</sup>;
- продолжительность выдержки под давлением в холодном прессе при склеивании должна быть не менее суток.

### Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы:

1. Доказана возможность использовать ПВА при производстве КДК при условии его модификации веществами, содержащими группы с высокой энергией взаимодействия: гидроксильные фенольные, карбоксильные.
2. Клеевая система позволяет утилизировать отходы лесохимического комплекса и повысить экологичность территорий Сибири, снизить их пожароопасность.

### Литература

1. Плотникова Г.П., Плотников Н.П., Кузьминых Е.А. Применение гидролизного лигнина в производстве древесно-полимерных композитов // Системы Методы Технологии. 2013. № 4 (20). С. 133-138.
2. Плотников Н.П., Симикина А.А., Плотникова Г.П. Исследование структуры модифицированных карбаминоформальдегидных смол методом ЯМР-спектроскопии // Вестн. Крас. гос. аг. ун-та. 2012. № 7. С. 171-174.
3. Чубинский М.А., Федяев А.А. Биостойкость клеевой древесины. Современные проблемы переработки древесины. СПб.: СПбГЛТУ, 2011. С. 119-120.
4. Чубинский М.А. Биостойкость древесины лиственницы: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2003. 16 с.
5. Чубинский А.Н., Медов В.С., Славик Ю.Ю. К вопросу оценки долговечности клеевых деревянных конструкций // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2013. Вып. 203. С. 128-134.
6. Чаузов К.В., Чубинский М.А., Шумякова Н., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Свойства клееного бруса на модифицированном связующем. Современные проблемы переработки древесины. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. С. 55-60.
7. Чаузов К.В., Варанкина Г.С. Исследование процесса склеивания древесины лиственницы композиционным клеем // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2014. Вып. 208. С. 111-120.
8. Чаузов К.В. Формирование клеевых деревянных брусков с использованием модифицированных свя-

зующих: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 20 с.

9. Тамби А.А., Чубинский А.Н., Варанкин Г.С., Брутян К.Г., Федяев А.А. Способ контроля качества клеевого соединения: пат. 2439538, Рос. Федерация; заявл. 14.10.10; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1-3 с.
10. Чубинский А.Н., Тамби А.А. Метод контроля клеевых соединений в процессе производства клеевых брусков из цельной древесины // Изв. С.-Петербург. гос. лесотехн. акад. СПб., 2008. Вып. 185. С. 208-213
11. Плотникова Г.П. Совершенствование технологии производства древесностружечных плит на основе модифицированных связующих с использованием некондиционной древесины: дис. ... канд. техн. наук. Братск, 2011. 149 с.
12. Плотникова Г.П., Плотников Н.П., Аксютенкова Н.Ю. Исследование физико-химических свойств двухкомпонентных лакокрасочных материалов // Системы Методы Технологии. 2013. № 4 (20). С. 129-133.
13. Тамби А.А., Чубинский А.Н., Чаузов К.В., Кульков А.М. Исследование клеевых соединений древесины // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2016. Т. 20, № 2. С. 120-126.
14. Чубинский А.Н., Медов В.С. Обоснование методики испытания клеевых соединений древесины на прочность при скалывании // Изв. С.-Петербург. гос. лесотехн. акад. СПб., 2015. Вып. 210. С. 180-189.
15. Чубинский А.Н., Ермолаев Б.В., Сосна Л.М. Свойства поверхности древесины во взаимодействии с жидким адгезивом // Деревообрабатывающая промышленность. 2003. № 1. С. 25.
16. Чубинский А.Н. Формирование клеевых соединений древесины: моногр. СПб.: СПбГУ, 1992. 168 с.
17. Чубинский А.Н., Федяев А.А., Тамби А.А. Влияние плотности древесины на качество формирования клеевых соединений // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2011. Вып. 195. С. 142-149.
18. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Федяев А.А. Влияние строения и свойств древесины на прочность ее склеивания // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2010. Вып. 190. С. 155-163.
19. Плотникова Г.П., Плотников Н.П. Оптимизация технологического процесса производства древесностружечных плит на модифицированном связующем с использованием некондиционного сырья // Вестн. Крас. гос. аг. ун-та. 2013. № 9. С. 249-256.

### References

1. Plotnikova G.P., Plotnikov N.P., Kuzminykh E.A. Use of hydrolytic lignin in production of wood and polymeric composites // Systems Methods Technologies 2013. № 4 (20). P. 133-138.
2. Plotnikov N.P., Simikina A.A., Plotnikova G.P. Research of structure of the modified carboamidoformaldehyde pitches by a nuclear magnetic resonance spectroscopy method // The Bulletin of KrasGAU. 2012. № 7. P. 171-174.
3. Chubinskii M.A., Fedyayev A.A. Biological stability of glued wood. Modern problems of processing of wood. SPb.: SPbGLTU, 2011. P. 119-120.

4. Chubinskii M.A. Bioproofness of wood of a larch: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. SPb., 2003. 16 p.
5. Chubinskii A.N., Medov V.S., Slavik Yu.Yu. To a question of assessment of durability of glued wooden designs // *Izvestia SPbLTA*. 2013. Vyp. 203. P. 128-134.
6. Chauzov K.V., Chubinskii M.A., Shumyakova N., Varankina G.S., Chubinskii A.N. Properties of a glued bar on the modified binding. Modern problems of processing of wood. SPb.: SPbGLTU, 2015. P. 55-60.
7. Chauzov K.V., Varankina G.S. Larch wood pasting process research composite glue // *Izvestia SPbLTA*. 2014. Vyp. 208. P. 111-120.
8. Chauzov K.V. Formation of glued wooden bars with use of the modified binding: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb.: SPbGLTU, 2015. 20 p.
- Tambi A.A., Chubinskii A.N., Varankina G.S., Brutyan K.G., Fedyaev A.A. Way of quality control of glue connection: pat. 2439538, Ros. Federatsiya; zayavl. 14.10.10; opubl. 10.01.12, Byul. № 1-3 p.
- Chubinskii A.N., Tambi A.A. A control method of glue connections in the course of production of glued bars from whole wood // *Izvestia SPbLTA*. 2008. Vyp. 185. P. 208-213.
9. Plotnikova G.P. Improvement of the production technology of wood chipboards on the basis of modified binding with use of sub-standard wood: dis. ... kand. tekhn. nauk. Bratsk, 2011. 149 p.
10. Plotnikova G.P., Plotnikov N.P., Aksyutenkova N.Yu. Research of physical and chemical properties of two-component paints and varnishes // *Systems Methods Technologies* 2013. № 4 (20). P. 129-133.
11. Tambi A.A., Chubinskii A.N., Chauzov K.V., Kul'kov A.M. Reserch of adhesive bond of wood // *Forestry Bulletin*. 2016. V. 20, № 2. P. 120-126.
12. Chubinskii A.N., Medov V.S. Justification of testing method of wood adhesive joints shearing strength // *Izvestia SPbLTA*. 2015. Vyp. 210. P. 180-189
13. Chubinskii A.N., Ermolaev B.V., Sosna L.M. Pine properties of a surface of wood in interaction with liquid adhesive // *Derevoobrabatativaushaya promishlennost' (Woodworking industry)*. 2003. № 1. P. 25.
14. Chubinskii A.N. Formation of glue compounds of wood: monogr. SPb.: SPbGU, 1992. 168 p.
15. Chubinskii A.N., Fedyaev A.A., Tambi A.A. Influence of density of wood on quality of formation of glue connections // *Izvestia SPbLTA*. 2011. Vyp. 195. P. 142-149.
16. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Fedyaev A.A. Influence of a structure and properties of wood on durability of her pasting // *Izvestia SPbLTA*. 2010. Vyp. 190. P. 155-163.
19. Plotnikova G.P., Plotnikov N.P. Optimization of technological process of production of wood chipboards on modified binding with use of sub-standard raw materials // *The Bulletin of KrasGAU*. 2013. № 9. P. 249-256.

## Строительные материалы на основе наполненных жидкостекольных композиций и область их применения

С.А. Белых<sup>а</sup>, Т.А. Лебедева<sup>б</sup>, А.М. Даминова<sup>с</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>а</sup>smit1@brstu.ru, <sup>б</sup>lebedewa@pochta.ru, <sup>с</sup>daminova\_work@mail.ru

Статья поступила 28.07.2017, принята 30.07.2017

*В статье приведены результаты исследований по получению теплоизоляционных, теплоизоляционно-конструкционных и жаростойких строительных материалов на основе наполненных жидкостекольных композиций с использованием малоэнергоёмких технологий вспенивания. В качестве сырьевой базы рассматриваются местные материалы техногенного происхождения, в частности микрокремнезем — ультрадисперсный отход Братского завода ферросплавов. Микрокремнезем применяется как для получения жидкого стекла, так и в качестве наполнителя пеностекольных композиций, что говорит о высокой утилизационной ёмкости получаемого материала. Жидкое стекло из микрокремнезема обладает широким диапазоном характеристик, что обуславливает возможность управления свойствами получаемого материала. В работе установлены закономерности структурообразования, обеспечивающие прочностные, теплоизоляционные и жаростойкие характеристики строительного материала. Изучены технологические режимы. Отмечены преимущества технологических решений, обеспечивающих стабильность технических характеристик материалов, что актуально при использовании технологий вспенивания. Установлена взаимосвязь между свойствами материалов и жидкого стекла, которая положена в основу матрицы применимости, т. е. возможность использования жидкого стекла с различными свойствами позволяет получать строительные материалы с широким диапазоном свойств. Данные рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии позволили обосновать результаты экспериментов и изучить глубокие структурные изменения в образцах на основе наполненных пеностекольных композиций, а также сделать вывод о процессах растворения SiO<sub>2</sub> с поверхности наполнителя с выделением кремнегеля, что способствует синтезу новообразований, обеспечивающих комплекс свойств материала, и доказывает возможность формирования установленных фаз.*

**Ключевые слова:** энергоэффективные строительные материалы; многотоннажный отход, микрокремнезем; ресурсо- и энергосберегающие технологии; пеностекольные композиции; тонкодисперсный наполнитель.

## Construction materials based on filled liquid-glass compositions and the field of their application

S.A. Belykh<sup>а</sup>, T.A. Lebedeva<sup>б</sup>, A.M. Daminova<sup>с</sup>

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>а</sup>smit1@brstu.ru, <sup>б</sup>lebedewa@pochta.ru, <sup>с</sup>daminova\_work@mail.ru

Received 28.07.2017, accepted 30.07.2017

*The article represents the results of research on the production of thermal insulation, insulation-structural and heat-resistant construction materials on the basis of filled liquid-glass compositions. To obtain the materials, low-energy-intensive foaming technologies have been used. As a raw material base, local materials of technogenic origin are considered, in particular microsilica - ultrafine dispersion of the Bratsk Ferroalloys Plant. In this case, microsilica is used both for the production of liquid glass and as a filler for foam glass compositions, which indicates a high utilization capacity of the material obtained. Liquid glass from microsilica has a wide range of characteristics, which makes it possible to control the properties of the resulting material. In the work patterns of structure formation are established, which ensure the strength, heat-insulating and heat-resistant characteristics of the building material. Technological regimes have been studied. Advantages of technological solutions ensuring the stability of technical characteristics of materials are noted, which is important when using foaming technologies. A relationship between the properties of materials and liquid glass is established, which is the basis for the matrix of applicability, that is, the possibility of using a liquid glass with different properties makes it possible to obtain building materials with a wide range of properties. The results of the experiments are substantiated by X-ray-phase analysis and IR spectroscopy. Through these methods, deep structural changes in samples based on filled foam glass compositions have been studied. These data made it possible to draw a conclusion about the processes of dissolution of SiO<sub>2</sub> from the filler surface with the release of silica gel, which promotes the synthesis of neoplasms providing a complex of material properties and proves the possibility of formation of established phases.*

**Keywords:** energy efficient building materials; large-tonnage waste; microsilica; resource and energy saving technologies; foamed glass composite; finely-disperse filler.

### Введение

Внедрение ресурсосберегающих технологий является актуальным направлением развития промышленности строительных материалов. В различных регионах

страны ресурсосбережению способствует вовлечение в производство отходов и побочных продуктов промышленности [1–4]. При этом наиболее эффективными в плане ресурсосбережения являются сырьевые матери-

лы техногенного происхождения высокой степени технологической готовности.

Учеными Братского госуниверситета доказана возможность использования малоэнергоёмкого жидкого стекла из микрокремнезема в качестве вяжущего для омоноличивания различных наполнителей, что позволяет получать строительные материалы с широким диапазоном свойств [5–13]. Путем наполнения жидкого стекла возможно получение теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов для ограждающих конструкций, внутренних стен и перегородок в малоэтажном строительстве, защиты древесины от возгорания, а также в качестве жаростойкой теплоизоляции промышленного оборудования [8, 14, 15].

Целью настоящих исследований является изучение закономерностей структурообразования, определяющих в дальнейшем эксплуатационные свойства и назначение материалов на основе наполненных жидкостекольных композиций.

Разнообразие свойств материала во многом зависит от свойств жидкого стекла и его влияния на процесс структурообразования материала.

Основным сырьевым компонентом для получения предлагаемых материалов является микрокремнезем — многотоннажный ультрадисперсный отход завода ферросплавов. Высокая дисперсность и, как следствие, активность микрокремнезема позволяют использовать его и в качестве наполнителя. Химический состав микрокремнезема представлен преимущественно двуокисью кремния  $\text{SiO}_2$  [12].

**Эксперимент.** Для получения теплоизоляционных ячеистых бетонов использовали технологию вспенивания [4; 8]. Путем наполнения пеностекольных композиций получены образцы бетонов с развитой поровой структурой. Средняя плотность образцов составляет 300–650  $\text{кг}/\text{м}^3$  (рис. 1). Для этих целей опробован ряд пенообразователей — «Морпен», ПО-6, окись амина, СМС «Тайга».

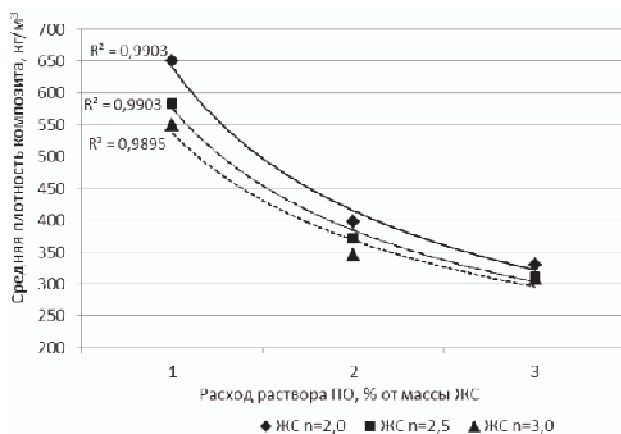


Рис. 1. Влияние расхода пенообразователя на среднюю плотность композиции

Для отверждения жидкостекольных композиций опробованы различные материалы. Кремнефтористый натрий ( $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ) — технический порошкообразный продукт с содержанием чистого вещества 90–95 %, общеизвестен как отвердитель жидкого стекла. Наряду с

этим, также как отвердитель, использована смесь сырьевого шлама и пыли газоочистки (ГО), представляющая собой просыпь шихты для выплавки алюминия.

Исследованиями в области строительного материаловедения установлено, что наполнение полимеров тонкодисперсными наполнителями способствует повышению их механических характеристик [7, 8, 13]. Микрокремнезем оказывает упрочняющее действие при введении в качестве наполнителя в жидкое стекло, которое является неорганическим полимером. Это действие зависит от вяжущих свойств жидкого стекла. За показатель вяжущих свойств приняли прочность затвердевших образцов. Результаты исследований по изучению вяжущих свойств жидкого стекла из микрокремнезема представлены на рис. 2.

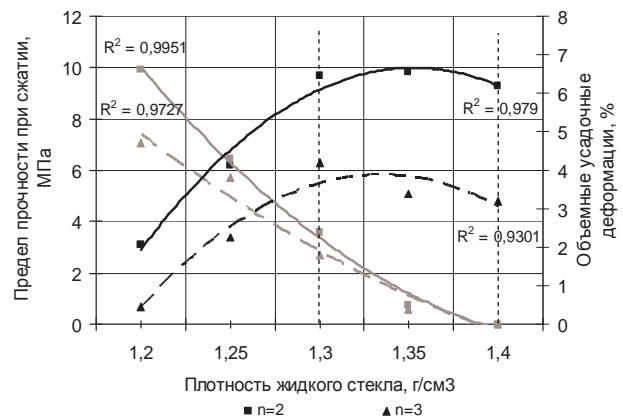


Рис. 2. Влияние силикатного модуля ( $n = 2; 3$ ) и плотности жидкого стекла на прочность при сжатии образцов на основе наполненного жидкого стекла (при оптимальной степени наполнения, лимитируемой формуемостью).

Предел прочности при сжатии: —, — — — — ; деформации усадки: —, — — — —

Отмечено, что лучшие вяжущие свойства присущи жидкому стеклу с силикатным модулем 2, однако с точки зрения объемных усадочных деформаций у получаемых бетонов предпочтительнее жидкое стекло с силикатным модулем 3.

Для формирования жаростойких свойств содержание жидкого стекла в бетоне должно быть сведено к минимуму, однако это возможно лишь при высоком уровне его вяжущих свойств, обеспечивающем требуемые прочностные характеристики. Другая задача — повышение температуры плавления жидкостекольной связки.

Указанные задачи решаются комплексно: путем снижения щелочности жидкого стекла; повышая силикатный модуль; применяя полисиликаты и золи кремнезема. Результаты исследования жаростойких свойств жидкостекольной связки представлены в табл. 1.

Данные таблицы свидетельствуют, что с увеличением силикатного модуля жидкого стекла остаточная прочность после нагрева до 800 °С возрастает, что согласуется с теоретическими сведениями. Но при этом установлено, что увеличение модуля отрицательно сказывается на вяжущих свойствах жидкого стекла.



Влияние свойств жидкого стекла и вида отвердителя на остаточную прочность образцов после нагревания до 800 °С

Вид отвердителя	Предел прочности при сжатии высушенных до постоянной массы образцов, МПа (над чертой); остаточная прочность после нагревания до 800 °С, МПа (под чертой); относительная остаточная прочность, % (рядом с дробью), при использовании жидкого стекла с силикатным модулем:									
	2,0		2,5		3,0		3,5		4,0	
Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	$\frac{10,1}{4,95}$	49,1	$\frac{9,4}{5,33}$	56,8	$\frac{7,63}{4,56}$	59,8	$\frac{6,26}{3,92}$	62,6	$\frac{4,5}{2,88}$	64,1
Смесь шлама и пыли ГО	$\frac{9,3}{5,07}$	54,5	$\frac{8,5}{5,47}$	64,4	$\frac{6,31}{5,11}$	73,1	$\frac{6,15}{4,50}$	73,2	$\frac{4,2}{3,16}$	75,3

Таким образом, и с точки зрения вяжущих свойств, и с точки зрения температуры плавления целесообразно использовать жидкое стекло со следующим интервалом свойств: силикатный модуль — 2,5–3,5; плотность — 1,3–1,4 г/см<sup>3</sup> (рис. 3).

Кроме того, установлено, что наиболее эффективным комплексным наполнителем является состав, включающий микрокремнезем, а также смесь шлама и пыли газоочистки. Следует отметить, что смесь шлама и пыли газоочистки обладает комплексным действием, т. е. выполняет функцию отвердителя и жаростойкой добавки. Это связано с наличием в составе смеси фтористых и щелочных компонентов (что обуславливает действие отвердителя), а также алюминатного компонента, способствующего синтезу жаростойких новообразований.

Для обоснования полученных данных использованы методы рентгеноструктурного анализа (РСА). Рентгенограммы образцов, снятые при угле 2 $\theta$ , представлены на рис. 4.

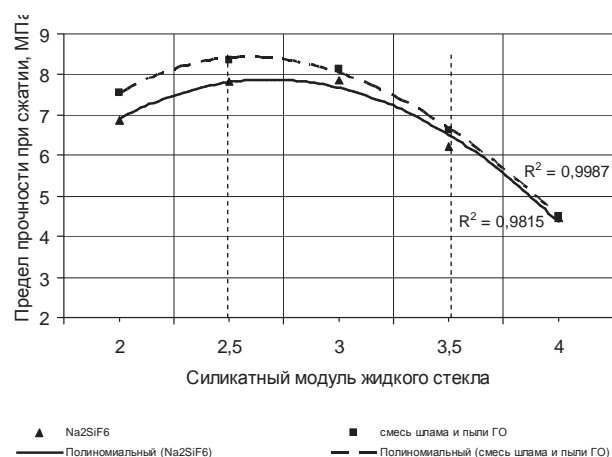


Рис. 3. Остаточная прочность после нагрева до 800 °С образцов на основе наполненного модифицированного жидкого стекла

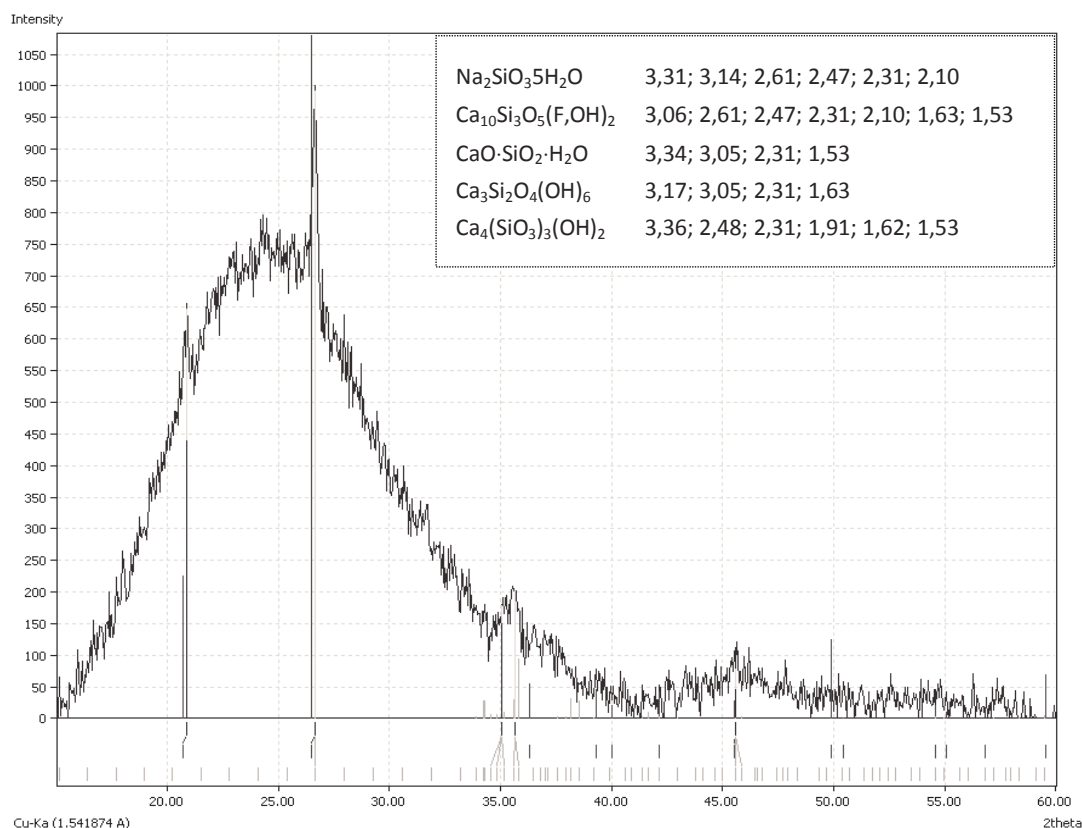


Рис. 4. Рентгенограммы высушенных до постоянной массы образцов на основе наполненного жидкого стекла из микрокремнезема с силикатным модулем 2

В результате идентификации межплоскостных расстояний среди продуктов твердения можно предположить низкоосновные гидросиликаты кальция, фторгидросиликаты, гидросиликаты натрия. При сравнении рентгенограмм образцов на основе жидкого стекла с различными свойствами отмечено, что дифракционные максимумы имеют большую интенсивность на рентгенограммах образцов на основе жидкого стекла с силикатным модулем 2. Это, очевидно, связано с более интенсивными процессами образования кристаллической фазы, обуславливающей более высокие механические характеристики композитов на основе жидкого стекла с силикатным модулем 2.

Данные рентгенофазового анализа сопоставили с данными ИК-спектроскопии. При рассмотрении ИК-спектров образцов и исходных компонентов (микрокремнезема и жидкого стекла) отмечены полосы поглощения в области  $700\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ , характерные для спектров силикатов с Si–O связями. На спектрах образцов (рис. 5) наблюдается смещение полос поглощения в сторону больших волновых чисел с увеличением их интенсивности. Полосы поглощения в области  $1060\text{--}1070\text{ см}^{-1}$  свидетельствуют о наличии различно сгруппированных между собой кремнекислородных тетраэдров с высокой степенью полимеризации.

Эти данные позволяют судить о процессах растворения  $\text{SiO}_2$  с поверхности наполнителя с выделением кремнегеля за счет нейтрализации щелочи жидкого стекла и увеличения количества связей Si–O–Si, что способствует появлению новообразований, таких как

гидросиликаты кальция, фторгидросиликаты, гидросиликаты натрия как результат коллоидно-химических процессов.

С целью изучения глубоких структурных изменений в образцах на основе наполненных жидкостекольных композиций в результате высокотемпературных воздействий также использованы методы PCA (рис. 6).

В результате идентификации межплоскостных расстояний на рентгенограммах образцов, подвергнутых температурному воздействию  $1300\text{ °C}$ , можно предварительно предположить наличие фаз кристобалита, тридимита и муллита, обеспечивающих класс жаростойких свойств материала не менее И13.

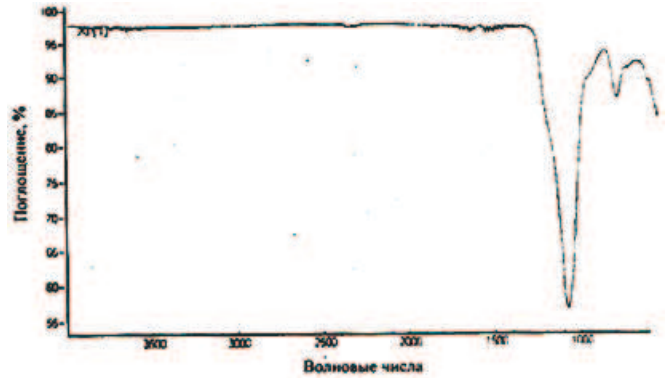


Рис. 5. ИК-спектры высушенных до постоянной массы образцов материалов на основе наполненных пеностекольных композиций

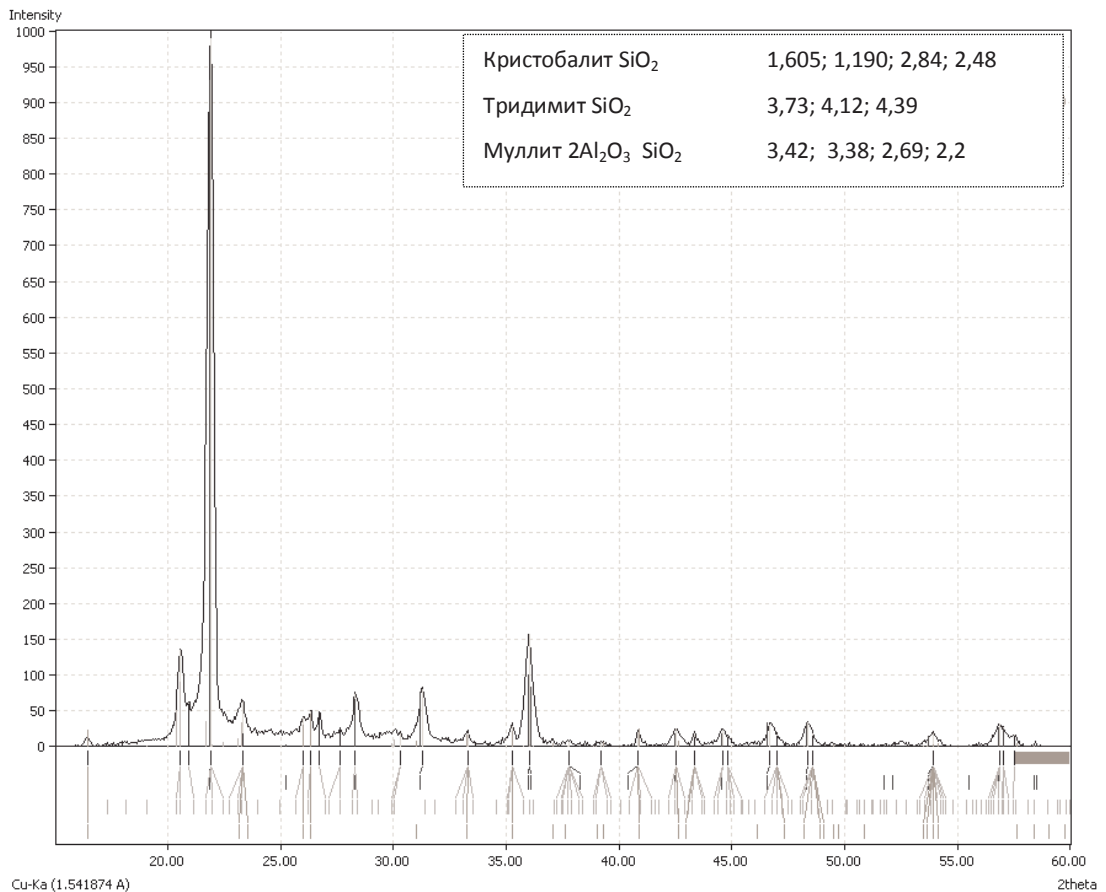


Рис. 6. Рентгенограммы образцов на основе наполненного жидкого стекла из микрокремнезема после воздействия температуры  $1300\text{ °C}$

Таким образом, возможность использования жидкого стекла с различными свойствами (табл. 2) для получения жидкостекольной композиции и в качестве вяжущего для омоноличивания тонкодисперсного наполнителя позволяет получать строительные материалы с широким диапазоном свойств:

- 1) марка по средней плотности:
  - для плит теплоизоляционных — D300–D500;
  - для блоков стеновых мелких — D600–D700;
- 2) класс по прочности на сжатие:

- для плит теплоизоляционных — до В 1,0;
  - для блоков стеновых мелких — В 2–2,5;
- 3) коэффициент теплопроводности в сухом состоянии при температуре  $25 \pm 5$  °С ( $298 \pm 5$  К),  $Bm/(MK)$ :
    - для плит теплоизоляционных — 0,08–0,12;
    - для блоков стеновых мелких — 0,13–0,15;
  - 4) класс по предельно допустимой температуре применения:
    - для блоков жаростойких — И3–И13.

Таблица 2

Рекомендации по определению характеристик состава в зависимости от назначения материала

Назначение материала			Расход добавки (в числителе) и пенообразователя (в знаменателе), % от массы жидкого стекла при его свойствах			
			n = 2 ρ = 1,4 г/см <sup>3</sup>	n = 2,5 ρ = 1,35 г/см <sup>3</sup>	n = 3 ρ = 1,3 г/см <sup>3</sup>	n = 3,5 ρ = 1,3 г/см <sup>3</sup>
Теплоизоляционный	D300	–	–	–	0/15	–
	D350	B0,5	–	–	–	–
	D400	B0,5	–	10/9	–	–
	D500	B0,75	–	10/6	–	–
Конструктивно-теплоизоляционный	D600	B1	–	–	–	–
		B2	10/5	–	–	–
	D700	B2	–	10/3	–	–
		B2,5	–	–	–	–
		B3,5	10/3	–	–	–
	D800	B3,5	–	10/0	–	–
	D900	B5	10/0	–	–	–
Жаростойкий	И3	–	–	10/5	–	
	И6	–	–	–	10/5	
	И9	–	–	–	10/0	
	И13	–	–	–	10/0	

Среди преимуществ материала можно отметить следующее. В процессе приготовления сырьевой смеси исключается разрушение пенной составляющей, что обеспечивает стабильные технические характеристики материалов. Кроме того, при получении жаростойкого теплоизоляционного материала не требуется его предварительная высокотемпературная обработка, а необходимые термомеханические свойства он приобретает на стадии эксплуатации.

Преимущество технологии заключается в ее экономичности за счет снижения затрат на материальные и энергоресурсы. Технология позволяет получать широкую номенклатуру строительных материалов на одной технологической линии, для организации которой требуется типовое оборудование.

### Заключение

В статье показана возможность получения строительных материалов на основе техногенного сырья высокой технологической готовности, что способствует экономии материальных и энергетических затрат при производстве строительных материалов многоцелевого применения. В основе технологии их получения — процессы наполнения жидкостекольных композиций. Установлено, что свойства материалов определяются вяжущими свойствами и жаростойкостью жидкостекольной связки. Требуемые структурные и механические показатели материалов обеспечиваются при использовании жидкого стекла из микрокремнезема с силикатным модулем 2–3,5 и плотностью 1,4–1,3 г/см<sup>3</sup>

соответственно. Полученные материалы имеют широкий диапазон свойств. Методами рентгенофазового анализа установлено, что требуемые свойства теплоизоляционных, конструкционно-теплоизоляционных и жаростойких теплоизоляционных материалов обусловлены синтезом новообразований, таких как низкоосновные гидросиликаты кальция и натрия, фторгидросиликаты, алюмосиликаты типа муллит.

### Литература

1. Копаница Н.О. Влияние комплексных модифицирующих добавок на свойства торфодревесных конструкционно-теплоизоляционных материалов / Н.О. Копаница // Вестн. Том. гос. архит.-строительного ун-та. 2011. № 3. С. 140-144.
2. Лукаш А.А., Лукутцова Н.П. Эффективные строительные материалы и изделия из техногенных отходов для жилищного строительства // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер. Материалы, конструкции, технологии. 2017. № 2. С. 26-37.
3. Кудяков А.И., Стешенко А.Б., Конушева В.В. Технико-экономическая эффективность производства модифицированного теплоизоляционного пенобетона // Инвестиции, строительство, недвижимое как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики: материалы VII Междунар. науч.-практической конф. / ТГАСУ. Томск, 2017. Ч. 1. С. 368-372.
4. Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Оптимизация технологических приемов приготовления пенобетонной смеси // Актуальные проблемы современности. 2016. № 2 (12). С. 197-203.
5. Кудяков А.И., Свергунова Н.А., Иванов М.Ю. Зернистый теплоизоляционный материал на основе модифицированной жидкостекольной композиции: моногр. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2010. 204 с.
6. Глебов М.П., Белых С.А., Патраманская С.В. Сырьевая смесь для изготовления легкого заполнителя: пат. 2167115 Рос. Федерация. № 99103418/03; заявл. 23.02.99; опубл. 20.05.01, Бюл. № 14.
7. Кудяков А.И., Белых С.А., Лебедева Т.А. Стеновые теплоизоляционные материалы и изделия из наполненных пеностекольных композиций: моногр. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2016. 192 с.
8. Белых С.А., Лебедева Т.А., Трофимова О.В. Малоэнергоемкая технология получения жаростойкого материала на основе наполненного жидкого стекла // Перспективные материалы в строительстве и технике (ПМСТ-2014): материалы междунар. науч. конф. молодых ученых / ТГАСУ. Томск, 2014. С. 255-259.
9. Белых С.А., Кудяков А.И., Лебедева Т.А., Рыжкова Е.Д. Сырьевая смесь для изготовления пенобетона: пат. 2228314 Рос. Федерация. № 2002121695/03; заявл. 06.08.02; опубл. 10.05.04, Бюл. № 13.
10. Кудяков А.И., Белых С.А., Даминова А.М. Сухие растворные смеси с гранулированными органоминеральными воздухововлекающими добавками // Вестн. Том. гос. архит.-строит. ун-та. 2009. № 3. С. 101-110.
11. Пименова Л.Н., Кудяков А.И. Пенобетон, модифицированных силикагелем // Вестн. Том. гос. архит. - строительного ун-та. 2013. № 2 (39). С. 229-234.
12. Лебедева Т.А., Кудяков А.И., Белых С.А. Жидкостекольные ячеистые материалы // Строительные материалы. 2005. № 5. С. 60-63.
13. Карнаухова Ю.П., Кудяков А.И., Белых С.А., Лебедева Т.А., Зиновьев А.А. Способ получения ячеистых строительных материалов: пат. 2209803 Рос. Федерация. № 2002103455 /03; заявл. 06.02.02; опубл. 10.08.03, Бюл. № 22.

14. Белых С.А., Новоселова Ю.В., Новоселов Д.А., Кудяков А.И. Структурообразование жидкостекольных композиций для защиты древесины от возгорания // Системы Методы Технологии. 2017. № 3 (35). С. 80-86.

15. Лебедева Т.А., Белых С.А., Трофимова О.В., Лебедев Д.И. Влияние состава жидкостекольной связки на ее жаростойкие свойства // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2011. Т. 2. С. 139-144.

### References

1. Kopanitsa N.O. Influence of complex modifiers on properties of peat-wooden constructive heat-insulation materials // Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2011. № 3. P. 140-144.
2. Lukash A.A., Lukuttsova N.P. Effective building materials from industrial waste for housing // Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Materials. Constructions. Technologies. 2017. № 2. P. 26-37.
3. Kudyakov A.I., Steshenko A.B., Konusheva V.V. Technical and economic production efficiency of a modified heat-insulating foam // Investitsii, stroitel'stvo, nedvizhimost' kak material'nyi bazis modernizatsii i innovatsionnogo razvitiya ekonomiki: materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakticheskoi konf. / TGASU. Tomsk, 2017. Ch. 1. P. 368-372.
4. Steshenko A.B., Kudyakov A.I. Optimization of production technology of foam concrete mixture // Actual problems of modernity. 2016. № 2 (12). P. 197-203.
5. Kudyakov A.I., Svergunova N.A., Ivanov M.Yu. Granulated heat-retention material based on the modified liquid glass composition: monogr. Tomsk: Izd-vo TGASU, 2010. 204 p.
6. Glebov M.P., Belykh S.A., Patramanskaya S.V. Raw mix for preparing light-weight filler: pat. 2167115 Ros. Federatsiya. № 99103418/03; yayavl. 23.02.99; opubl. 20.05.01, Byul. № 14.
7. Kudyakov A.I., Belykh S.A., Lebedeva T.A. Wall heat-insulating materials and products from filled with foamed glass composite: monogr. Tomsk: Izd-vo TGASU, 2016. 192 p.
8. Belykh S.A., Lebedeva T.A., Trofimova O.V. An energy-saving technology of obtaining heat-resistant material based on liquid glass-filled // Perspektivnye materialy v stroitel'stve i tekhnike (PMST-2014): materialy mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchennykh / TGASU. Tomsk, 2014. P. 255-259.
9. Belykh S.A., Kudyakov A.I., Lebedeva T.A., Ryzhkova E.D. Raw mixture for preparation of a foamed concrete: pat. 2228314 Ros. Federatsiya. № 2002121695/03; yayavl. 06.08.02; opubl. 10.05.04, Byul. № 13.
10. Kudyakov A.I., Belykh S.A., Damino A.M. Dry mortar mixtures with granulated organomineral air-entraining additives // Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2009. № 3. P. 101-110.
11. Pimenova L.N., Kudyakov A.I. Foam concrete modified with silica gel // Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2013. № 2 (39). P. 229-234.
12. Lebedeva T.A., Kudyakov A.I., Belykh S.A. Liquid glass cellular materials // Stroitel'nye Materialy. 2005. № 5. P. 60-63.
13. Karnaukhov Yu.P., Kudyakov A.I., Belykh S.A., Lebedeva T.A., Zinov'ev A.A. Method of manufacturing cellular building materials: pat. 2209803 Ros. Federatsiya. № 2002103455/03; yayavl. 06.02.02; opubl. 10.08.03, Byul. № 22.
14. Belykh S.A., Novoselova Yu.V., Novoselov D.A., Kudyakov A.I. Structure formation of liquid-glass compositions for wood protection against ignition // Systems Methods Technologies. 2017. № 3 (35). P. 80-86.
15. Lebedeva T.A., Belykh S.A., Trofimova O.V., Lebedev D.I. The influence of the composition of liquid glass ligament at its heat-resistant properties // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri. 2011. T. 2. P. 139-144.

