УДК 539.12.08 + 699.887,5 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-94-99

Использование железо-водных и дерево-железных смесей в защите от ионизирующих излучений

В.А Соколова[a], А.Р. Бирман[b], В.В. Орлов[c], А.В. Теппоев[d], А.С. Кривоногова[e], И.В. Бачериков[f], Г.К. Парфенопуло[g]

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер. 5, Санкт-Петербург, Россия
[a]sokolova_vika@inbox.ru, [b]birman1947@mail.ru, [c]artictvetal1987@gmail.com, [d]avt01@inbox.ru,
[e]kas.spb.lta@mail.ru, [f]ivashka512@gmail.com, [g]parfenon73@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0001-6880-445X, [b]https://orcid.org/0000-0003-0416-4232, [c]https://orcid.org/0000-0001-8556-3555,
[d]https://orcid.org/0000-0002-8589-444X , [e]https://orcid.org/0000-0001-6320-7197, [f] https://orcid.org/0000-0002-0531-1604,
[g]https://orcid.org/0000-0002-3701-9536
Статья поступила 15.10.2017, принята 20.11.2017

Обосновывается возможность использования специально обработанных древесных материалов как средства защиты от нейтронных потоков. Показана возможность использования предлагаемых материалов в качестве элемента защиты ядерных реакторов. В атомной промышленности в качестве защиты от поражающего живую ткань нейтронного излучения используют вещества с высоким содержанием водорода. Древесина, натуральная или борированная, – водородосодержащий материал. Причем содержание водорода в единице объема древесины не меньше, а иногда и больше, чем в единице объема традиционных защитных материалов. Анализируя литературные источники, можно сделать вывод, что древесина и древесные материалы не только не используются, но и не рассматриваются и не исследуются в качестве нейтронозащитных. Цель данного исследования заключается в оценке ослабления нейтронных потоков при встрече с защитой из дерево-железных смесей. Защита от излучений должна состоять из материалов, включающих легкие и тяжелые элементы. Последствия аварий на АЭС в Чернобыле и Фукусиме указывают на важность обеспечения радиационной безопасности и необходимость расширения спектра научных исследований, направленных на поиск и создание новых нейтронозащитных материалов. До настоящего времени большинство исследований имели задачу оценки изменения свойств древесины под воздействием ионизирующих излучений. Одним из направлений настоящей работы является рассмотрение обратной задачи: не оценка изменений в древесине, а исследование ослабления нейтронного и гамма-излучения при встрече с защитой из древесины — как натуральной, так и модифицированной уплотнением и (или) пропиткой. Исследуемая дерево-железная смесь может быть использована в качестве альтернативного материала водородосодержащей компоненты биологической защиты ядерной энергетической установки.

Ключевые слова: защитный материал; нейтронное излучение; железо-водные смеси; дерево-железные смеси.

The use of iron-water and wood-iron mixtures in protection from ionizing radiation

V.A. Sokolova[a], A.R. Birman[b], V.V. Orlov[c], A.V. Teppoev[d], A.S. Krivonogova[e], I.V. Bacherikov[f], G.K. Parfenopulo[g]

St. Petersburg State Forestry University under name S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia
[a]sokolova_vika@inbox.ru, [b]birman1947@mail.ru, [c]artictvetal1987@gmail.com, [d]avt01@inbox.ru,
[e]kas.spb.lta@mail.ru, [f]ivashka512@gmail.com, [g]parfenon73@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0001-6880-445X, [b]https://orcid.org/0000-0003-0416-4232, [c]https://orcid.org/0000-0001-8556-3555,
[d]https://orcid.org/0000-0002-8589-444X , [e]https://orcid.org/0000-0001-6320-7197, [f] https://orcid.org/0000-0002-0531-1604,
[g]https://orcid.org/0000-0002-3701-9536
Received 15.10.2017, accepted 20.11.2017

The article substantiates the possibility of using specially processed wood materials as a means of protection against neutron fluxes. The possibility of using the proposed materials as an element of protection of nuclear reactors is shown. In the nuclear industry, substances with a high hydrogen content used as protection against neutron radiation that affects living tissue. Wood, natural or borated, is a hydrogen-containing material. Moreover, the hydrogen content per unit volume of wood is not less, and sometimes more than in the unit volume of traditional protective materials. Analyzing the literature sources, it can be concluded that wood and wood materials are not only used, but are neither considered nor investigated as neutron-protective ones. The purpose of this study is to estimate the attenuation of neutron fluxes when encountering protection from wood-iron mixtures. Protection from radiation should consist of materials including light and heavy elements. The consequences of accidents at nuclear power plants in Chernobyl and Fukushima indicate the importance of ensuring radiation safety and the need to expand the range of scientific research aimed at finding and creating new neu-

tron-protective materials. To date, most studies have been tasked to assess the change in the properties of wood under the influence of ionizing radiation. One of the directions of the present work is to consider the inverse problem: not the evaluation of changes in wood, but the study of the attenuation of neutron and gamma radiation when encountering protection from wood, both natural and modified by compaction and (or) impregnation. The investigated wood-iron mixture can be used as an alternative material for the hydrogen-containing component of the biological protection of the nuclear power plant.

Key words: protective material; neutron radiation; iron-water mixtures; wood-iron mixtures.

Введение

Основное назначение защиты от излучений ядерной энергетической установки (ЯЭУ) заключается в ослаблении потоков нейтронного и гамма-излучения, образующихся в активной зоне реактора и других элементах оборудования установки, до уровней, безопасных для здоровья человека [1]. Чтобы эффективно выполнять эти функции, защитный материал должен удовлетворять определенным ядерно-физическим требованиям, а именно: быть хорошим замедлителем быстрых нейтронов, иметь большое сечение поглощения тепловых нейтронов (при этом захват нейтронов не должен сопровождаться образованием жесткого гамма-излучения) и, наконец, быть хорошим поглотителем гамма-излучений [2].

Таблица 1

Преимущества и недостатки воды и древесины как элементов биологической защиты от нейтронов

Вода		Древесина	
Преимущества	Недостатки	Преимущества	Недостатки
Дешевизна	Текучесть	Дешевизна	Пожаро-безопасность
Доступность		Доступность	
Высокая концентрация H		Высокая концентрация H	
Пожаробезопасность		Нетекучесть	

Совокупности этих требований не удовлетворяет ни одно из известных веществ. Если элементы с большим атомным весом (A>50) являются хорошими поглотителями гамма-излучения и замедлителями быстрых нейтронов энергии выше порога неупругого рассеяния (E~ 0,5–0,8 МэВ), то в области ниже этого порога процесс замедления более эффективен на ядрах легких элементов, особенно на водороде. Захват тепловых нейтронов ядрами большинства элементов сопровождается образованием высокоэнергетичных гамма-квантов, что создает дополнительные трудности при создании защиты от излучений ЯЭУ.

Из сказанного следует, что защита от излучений должна состоять из материалов, включающих легкие и тяжелые элементы. Кроме того, в состав защиты часто вводят вещества, поглощающие тепловые нейтроны при малом выходе жестокого гамма-излучения (бор, литий).

Помимо вышеперечисленных требований материалы защиты должны:

– допускать простой монтаж, легко поддаваться ремонту и замене;

– быть огнестойкими и не выделять ядовитых газов при повышении температуры;

– не оказывать коррозийного действия на металлические конструкции, быть химически инертными к среде, в которой находятся.

Кроме того, материалы, используемые в первичной защите (вблизи активной зоны реактора), должны обладать высокой радиационной стойкостью, т. е. их свойства не должны изменяться в течение времени эксплуатации установки.

Древесина является водосодержащими материалом, допускающим введение в ее объем бора или веществ, содержащих бор. При этом конструкционные свойства, высокая технологичность производства и дешевизна изготовления элементов практически любых форм и размеров позволяет рассматривать древесину как возможный материал биологической защиты.

Однако, анализируя литературные источники, можно сделать вывод о том, что древесина и древесные материалы не только не используются, но и не рассматриваются как защитные [3–10].

До настоящего времени большинство исследований имели задачу оценки изменения свойств древесины под воздействием ионизирующих излучений.

Целью настоящих исследований является не оценка изменений в древесине, а исследование ослабления нейтронного и гамма-излучения при встрече с защитой из древесины — как натуральной, так и модифицированной уплотнением и (или) пропиткой [10–20].

Методика исследований. Объектами исследований стали образцы защитного материала, собранного из двух пластин — железной и деревянной. Толщина образцов в направлении ионизирующего излучения составляла от 30 до 100 нм, энергия излучения — от 0,4 эВ до 10 МэВ. В ряде опытов исследовалась как натуральная, так и уплотненная борированная древесина с плотностью 1,2 г/см^3.

Результаты исследования. В табл. 1 приведены результаты анализа воды и древесины как элементов биологической защиты.

Анализ рис. 1 и 2 показывает, что зависимость изменения плотности потоков нейтронов разных групп (разных энергий) от толщины материала защиты аналогична для воды и древесины.

Вследствие этого, по аналогии с железо-водными защитами, были проведены расчеты дерево-железных защитных смесей, результаты которых представлены на рис. 3 и 4.

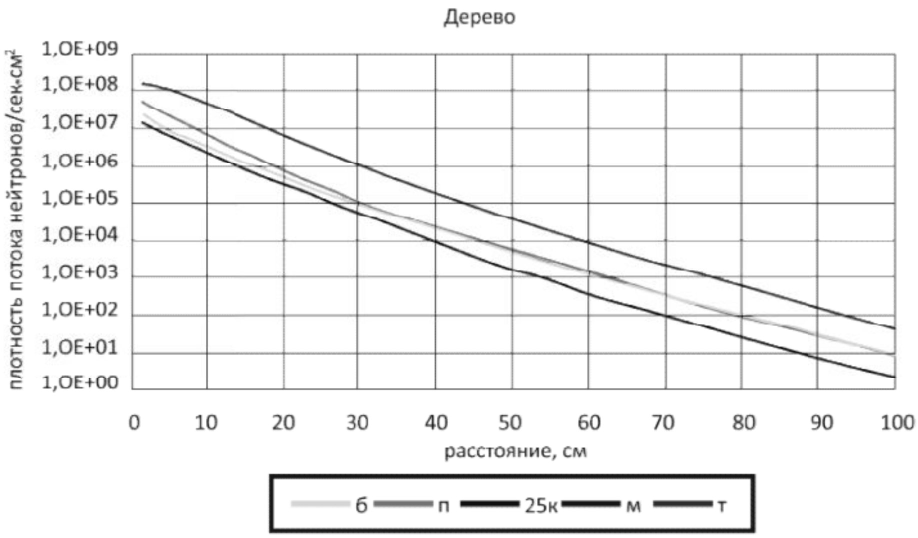


Рис. 1. Зависимость плотности потоков нейтронов разных групп в монолите дерева толщиной 150 см в зависимости от расстояния, блочная геометрия

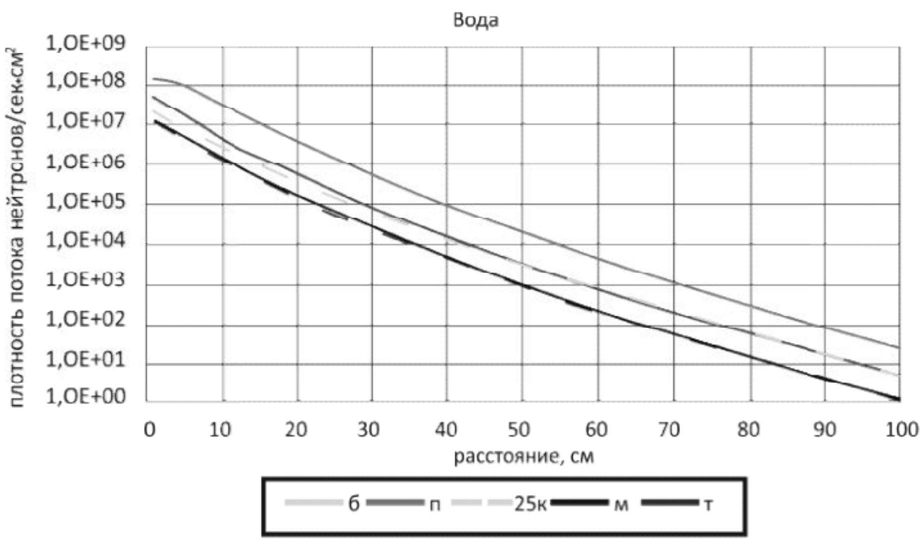


Рис. 2. Зависимость плотности потоков нейтронов разных групп в монолите воды толщиной 150 см в зависимости от расстояния, блочная геометрия

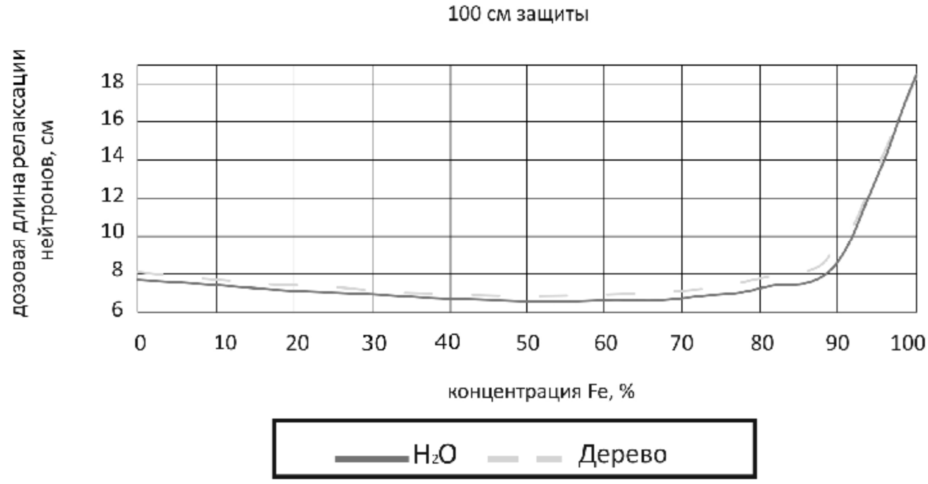


Рис. 3. Зависимость дозовой длины релаксации нейтронов в железно-водной и дерево-железной смесях от концентрации железа для толщины слоя 100 см, барьерная геометрия

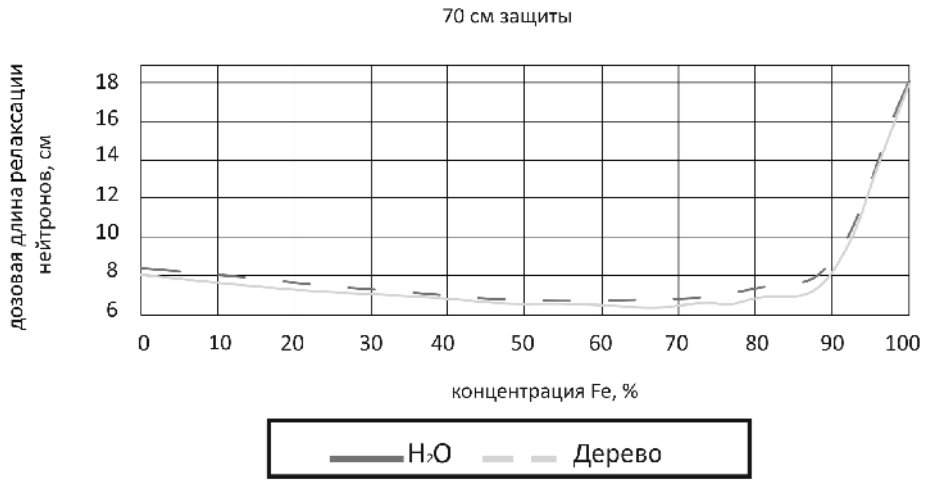


Рис. 4. Зависимость дозовой длины релаксации нейтронов в железо-водной и дерево-железной смесях от концентрации железа для толщины слоя 70 см, барьерная геометрия

В древесине значительную часть объема занимает поровое пространство (от 55 до 72 % объема древесного образца). Состав древесины можно менять с помощью заполнения порового пространства путем пропитки древесины различными материалами в зависимости от желаемого результата. Например, для повышения концентрации водорода возможно заполнение порового пространства полиэтиленом, полиметилметакрилатом. Возможна металлизация древесины, например, за счет пропитки солями тяжелых металлов. Для уменьшения выхода захватного гамма-излучения в состав древесины возможно введение бора (B) с помощью пропитки образца борной кислотой. Также возможно уплотнение древесины до плотности 1,2 г/см^3 [1]. Уплотненная древесина (1,15 г/см^3) имеет следующие ядерные плотности (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики уплотненной древесины

Дерево		Вода	
Элемент	Ядерная плотность, x10^{22} ядер/см^3	Элемент	Ядерная плотность, x10^{22} ядер/см^3
H	5,04	H	6,7
C	3,22	O	3,35
N	0,0208	–	–
O	1,58		

Очевидно (табл. 2), что ядерная плотность по водороду для уплотненной древесины несколько меньше, но сопоставима с ядерной плотностью по водороду для воды.

Таблица 3

Условные обозначения энергетических интервалов

Нейтроны	Обозначения	Группы нейтронов	Интервал энергий
Быстрые	б	1–11	10–1,11 МэВ
Промежуточные	п	12–17	1,11 МэВ – 29 эВ
25 кэВ	25 к	14	111 кэВ – 3,35 кэВ
Медленные	м	18–21	29 эВ – 1,12 эВ
Тепловые	т	22	0,414 эВ – 0

Изготовление блоков сложного профиля из цельной древесины — относительно сложная в технологическом и экономическом плане задача. Но изготовление защитных блоков возможно из измельченной древесины с помощью термопьезообработки, т. е. без внесения в древесную массу клеящих веществ.

Таблица 4

Оптимальные концентрации F_e

Толщина барьера, *см*	Fe + Вода		Fe + Дерево	
	Концентрация Fe, %	Минимальная дозовая длина релаксации нейтронов, *см*	Концентрация Fe, %	Минимальная дозовая длина релаксации нейтронов, *см*
100	62	6,5	62	6,7
70	59	6,52	55	6,8
50	50	6,59	45	6,94
30	30	6,57	30	7,06

Горючесть древесины резко снижается при ее пропитке боросодержащими антипиренами.

Для определения целесообразности использования древесных материалов в качестве защиты от ионизирующих излучений в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова был проведен ряд расчетов, позволяющих установить эффективность ослабления нейтронов и гамма-квантов в данных материалах. Расчеты проводились с помощью программы ANISN, которая реализует Sn-метод Карлсона для решения кинетического уравнения и является достаточно точным и удобным инструментом для подобного рода расчетов.

Использование древесины в качестве биологической защиты стоит рассматривать применительно к ядерным реакторам. В этом случае имеют место широкий спектр нейтронов и значительные плотности потоков. Для воды и древесины с плотностью 1,15 г/см^3 были проведены расчеты ослабления плотности потоков нейтронов деления в слое материала в зависимости от расстояния. Геометрия расчета — сферическая: активная зона радиусом 30 см со спектром нейтронов деления окружалась слоем защиты различной толщины. Плотности потоков нейтронов и гамма-квантов рассчитывались на выходе из защиты. Полученные результаты представлены на рис. 5 и 6.

В соответствии с разбиением энергетического интервала гамма-квантов в программе ANISN введены условные обозначения (табл. 3), условия проведения расчетов представлены в табл. 4.

На графиках (рис. 3 и 4) видно, что дозовая длина релаксации для двух смесей отличается незначительно.

В процессе замедления нейтронов образуются захватные гамма-кванты. Графики (рис. 5 и 6) показывают зависимость мощности доз образовавшихся гамма-квантов, отнесенных к плотности потоков нейтронов, падающих на защиту из дерева и воды, от толщины материала.

В результате более эффективного ослабления нейтронов водой, судя по графикам на рис. 5 и 6, в воде гамма-квантов больше. Разница с расстоянием растет.

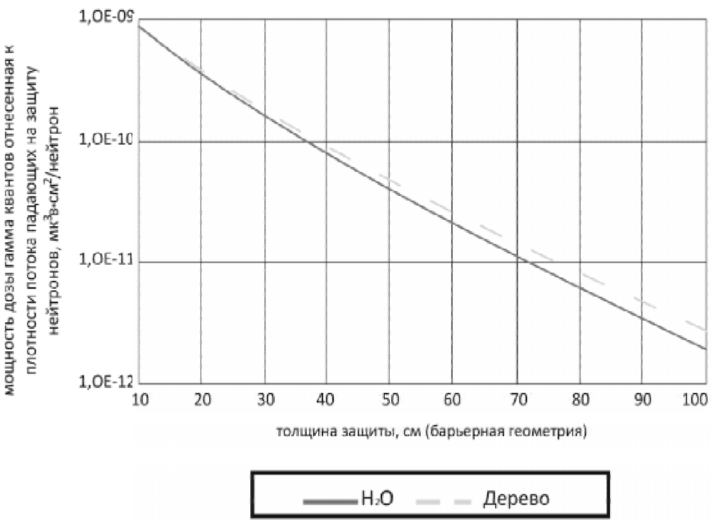


Рис. 5. Мощность дозы гамма-квантов, отнесенная к плотности потока падающих на защиту нейтронов, в зависимости от толщины слоя защиты, барьерная геометрия

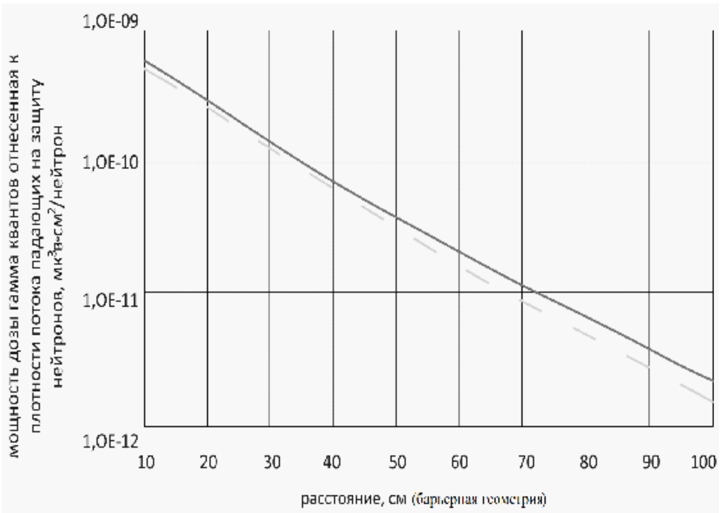


Рис. 6. Мощность дозы гамма-квантов, отнесенная к плотности потока падающих на защиту нейтронов, в зависимости от расстояния в слое защиты 150 см, барьерная геометрия

Заключение

Рассмотренный материал может быть использован в качестве альтернативного материала водородосодержащей компоненты биологической защиты ядерной энергетической установки.

Выводы

1. Защита от ионизирующих излучений должна состоять из материалов, включающих легкие (водородосодержащие) и тяжелые элементы.

В качестве легкого элемента предлагается использовать борированную древесину (цельную или измельченную), которая обладает свойствами конструкционного материала и высокой технологичностью при обработке.

2. В процессе замедления нейтронов защитными материалами образуются биологически опасные захватные гамма-кванты. Проведенные расчеты, результаты которых иллюстрируются графиками, доказывают преимущество дерево-железных защитных экранов по сравнению с железо-водными за счет более эффективного снижения первыми числа захватных гамма-квантов.

Литература

1. Бирман А.Р., Белоногова Н.А. Нейтронозащитные свойства древесины // Лесной журнал, 2008. №. 1. С. 11-15.
2. Бирман А.Р., Белоногова Н.А., Леонова О.Н. Веселовский А.Н. Новый нейтронозащитный материал // Изв. СПбГЛТА, 2005. Вып. 172. С. 32-35.
3. Руководство по радиационной защите. М.: Автомиздат, 1972. 96 с.
4. Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «Прогресс». М.: ЦМИИ «ВНИИФТРИ» Госстандарта России. М.: ГП «ВНИИФТРИ», 1996. 68 с.
5. Конович А.Л. К экологическому нормированию допустимых концентраций радиоактивных веществ // Экология, 1992. № 6. С. 72-73.
6. Руденко Jl.H. Накопление и распределение техногенных радионуклидов в лесных экосистемах Красноярского края: дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2003. 159 с.
7. Лощилов Н.А., Кашпаров В.А., Юдин Е.Б., Процак В.П. Фракционирование радионуклидов в чернобыльских топливных горячих частицах // Радиохимия, 1992. Т. 34, № 5. С. 125-134.
8. Экологические последствия радиоактивного загрязнения природных сред в районе аварии на Чернобыльской АЭС: докл. для представления на 14 сессию совета управляющих ЮНСП. М., 1987. 56 с.
9. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах центральных районов Восточно-Европейской равнины: автореф. дис. … д-ра с.-х. наук. М., 1997. 45 с.
10. Криволуцкий Д.А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А., Пожарский А.Д. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз. М.: Гео, 1988. 240 с.
11. Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Тихомирова Ф.А. Радионуклиды в продукции лесного хозяйства (зона радиоактивного загрязнения ЧАЭС) // Аграрная наука, 1996. № 3. С. 26-29.
12. Абдурагимов И.М., Однолько А.Н. Чернобыльское эхо лесных пожаров // Лесное хозяйство.1994. № 2. С. 30-32.
13. Агапкина Г.И., Тихомиров Ф.А., Щеглов А.И. Динамика содержания и органические формы соединений радионуклеидов в жидкой фазе лесных почв зоны загрязнения ЧАЭС // Экология. 1994. № 1. С. 16-21.
14. Алексахин Р.М. Радиоактивное загрязнение почвы и растений. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 132 с.
15. Алексахин Р.М., Нарышкин М.А. Миграция радионуклеидов в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1977. 142 с.
16. Богачев А.В. Закономерности радиоактивного загрязнения элементов лесных биогеоценозов // Лесохозяйственная информация.1994. № 7. С. 12-16.
17. Бирман А.Р., Стрелкова С.И., Шавер И.Х. Способ обработки древесины: а.с. 1625695 СССР. Бюл. 1991. № 5. С. 46.
18. Белоногова Н.А. Повышение защитных свойств низкосортной древесины путем пропитки и уплотнения: автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб., 1999. 20 с.
19. Белоногова Н.А., Веселовский А.Н., Леонова О.Н. Применение древесных материалов для защиты объектов от воздействия нейтронов // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2004. № 171. С. 87-93.
20. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. СанПин 2.6.1.2523-09, М.: Минздрав России, 2009.
21. Древесина защищает от ионизирующего излучения // ЛесПромИнформ. 2017. № 4. С. 144-146.

References

1. Birman A.R., Belonogova N.A. Neutron protective wood-materials // Forestry Bulletin. 2008. №. 1. P. 11-15.
2. Birman A.R., Belonogova N.A., Leonova O.N., Veselovskii A.N. New neutron-protective material // Izv. SPbGLTA. 2005. Vyp. 172. P. 32-35.
3. Guide to Radiation Protection. M.: Avtomizdat, 1972. 96 p.
4. The procedure for measuring the activity of radionuclides in countable samples on a scintillation gamma spectrometer using the "Progress" software / TsMII «VNIIFTRI» Gosstandarta Rossii. M.: GP «VNIIFTRI», 1996. 68 p.
5. Konovich A.L. To ecological regulation of permissible concentrations of radioactive substances // Russian Journal of Ecology, 1992. № 6. P. 72-73.
6. Rudenko Jl.H. Accumulation and distribution of technogenic radionuclides in forest ecosystems of the Krasnoyarsk Region: dis. … kand. tekhn. nauk. Krasnoyarsk, 2003. 159 p.
7. Loshchilov H.A., Kashparov V.A., Yudin E.B., Protsak V.P. Fractionation of radionuclides in Chernobyl fuel hot particles // Radiochemistry, 1992. T. 34, № 5. P. 125-134.
8. Ecological consequences of radioactive contamination of natural environments in the area of the Chernobyl accident: dokl. dlya predstavleniya na 14 sessiyu soveta upravlyayushchikh YuNSP / sost. Yu.A. Izrael’. M., 1987. 56 p.
9. Shcheglov A.I. Biogeochemistry of technogenic radionuclides in forest ecosystems of the central regions of the East European Plain: avtoref. dis. … d-ra s.-kh. nauk. M., 1997. 45 p.
10. Krivolutskii D.A., Tikhomirov F.A., Fedorov E.A., Pozharskii A.D. The effect of ionizing radiation on biogeocenosis. M.: Geo, 1988. 240 p.
11. Shcheglov A.I., Tsvetnova O.B., Tikhomirova F.A. Radionuclides in forestry products (Chernobyl radioactive contamination zone) // Agrarian science. 1996. № 3. P. 26-29.
12. Abduragimov I.M., Odnol’ko A.N. Chernobyl echo of forest fires // Lesn. khozyaistvo. 1994. № 2. P. 30-32.
13. Agapkina G.I., Tikhomirov F.A., Shcheglov A.I. Dynamics of content and organic forms of compounds of radio nuclides in the liquid phase of forest soils of the Chernobyl contamination zone // Russian Journal of Ecology, 1994. № 1. P. 16-21.
14. Aleksakhin P.M. Radioactive contamination of soil and plants. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. 132 p.
15. Aleksakhin P.M., Naryshkin M.A. Migration of radionuclides in forest biogeocenoses. M.: Nauka, 1977. 142 p.
16. Bogachev A.V. Regularities of radioactive contamination of forest biogeocenosis elements // Forestry Information, 1994. № 7. P. 12-16.
17. Birman A.R., Strelkova S.I., Shaver I.Kh. Wood processing method: a.s. 1625695 SSSR. Byul, 1991. № 5. P. 46.
18. Belonogova N.A. Increasing the protective properties of low-grade wood by impregnating and compacting: avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk. SPb., 1999. 20 p.
19. Belonogova N.A., Veselovskii A.N., Leonova O.N. The use of wood materials to protect objects from neutrons // Izv. SPbGLTA, 2004. № 171. P. 87-93.
20. Norms of radiation safety NRB-99/2009, SanPin 2.6.1.2523-09. M.: Minzdrav Rossii, 2009.
21. Wood protects from ionizing radiation // LesPromInform, 2017. № 4. P. 144-146.

УДК 674.815 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-100-104

Получение и свойства плит OSB с фенолкарданолформальдегидными связующими

Н.С. Баулина[1 a], О.Ф. Шишлов[1 b], В.В. Глухих[2 c]

[1]ПАО «Уралхимпласт», Северное шоссе 21, Нижний Тагил, Россия
[2]Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт 37, Екатеринбург, Россия
[a]N.Baulina@ucp.ru, [b]O.Shishlov@ucp.ru, [c]gvictor@e1.ru
[a]https://orcid.org/0000-0001-5505-4143, [b]https://orcid.org/0000-0002-4656-5969,
[c]https://orcid.org/0000-0001-6120-1867
Статья поступила 15.01.2018, принята 2.02.2018

В связи с истощением ресурсов нефти и природного газа в мире проводятся научные исследования по замене синтетических химических соединений на вещества, получаемые из возобновляемых растительных ресурсов. Среди полимерных связующих, используемых для производства древесных композиционных материалов (древесностружечных и древесноволокнистых плит, фанеры, древесно-слоистых пластиков), значительную долю составляют водорастворимые резольные фенолформальдегидные смолы (ФФС). Постоянный рост цен на синтетический фенол пропорционально ценам на нефть приводит к необходимости решения актуальной задачи сегодняшнего дня по снижению себестоимости производства ФФС. В статье рассматриваются вопросы о возможности использования для производства древесностружечных плит с ориентированной крупноразмерной стружкой (OSB, ОСП) фенолформальдегидных связующих, полученных с частичной заменой синтетического фенола на карданол (мета-алкилфенол, выделяемый из жидкости скорлупы орехов кешью). Для этого в ПАО «Уралхимпласт» (Нижний Тагил, Россия) были получены лабораторные образцы водорастворимых резольных фенолкарданолформальдегидных смол с частичной заменой при их синтезе синтетического фенола на 7,5 и 15 мас. % карданола. Полученные карданолсодержащие смолы по свойствам не отличаются от фенолформальдегидных смол, традиционно использующихся для производства древесных плит. В работе как поисковое исследование было оценено влияние на свойства плит OSB двух технологических факторов — расхода смолы и степени замещения в ФФС синтетического фенола на карданол. Для этого был проведен полный двухфакторный трехуровневый эксперимент по композиционному плану Коно. Регрессионный анализ результатов эксперимента показал, что, с доверительной вероятностью 0,95, замена при синтезе смол синтетического фенола на карданол до 15 мас. % не влияет на свойства этих плит. Полученные фенолкарданолформальдегидные смолы можно рекомендовать к опытно-промышленной проверке при производстве плит OSB.

Ключевые слова: плиты OSB; фенолкарданолформальдегидные смолы; получение; свойства.

Production and properties of OSB with phenolcardanolformaldehyde rezins

N.S. Baulina[1a], O.F. Shishlov[1b], V.V. Glukhikh[2c]

[1]JSC "Uralchimplast"; 21, Severnoye shosse, Nizhny Tagil, Russia
[2]Ural State Forest Engineering University; 37, Sibirsky tract, Yekaterinburg, Russia
[a]N.Baulina@ucp.ru, [b]O.Shishlov@ucp.ru, [c]gvictor@e1.ru
[a]https://orcid.org/0000-0001-5505-4143, [b]https://orcid.org/0000-0002-4656-5969,
[c]https://orcid.org/0000-0001-6120-1867
Received 15.01.2018, accepted 2.02.2018

In connection with the depletion of oil and natural gas resources in the world, scientific research is under way to replace synthetic chemical compounds with substances derived from renewable plant resources. For the production of wood composite materials (chipboard and fiberboard, plywood, wood-laminated plastics), water-soluble resoluble phenol-formaldehyde resins (PFR) make up a significant proportion of the polymer binders used. The constant rise in prices for synthetic phenol, proportional to oil prices, leads to the need to address the urgent task of today - reducing the cost of production of the PFR. The article discusses the possibility of using phenol-formaldehyde binders obtained with the partial replacement of synthetic phenol with cardanol (meta-alkylphenol isolated from the liquor shell of cashew nuts) for production of chipboard with oriented large-scale chips (OSB, OSB). For this, laboratory samples of water-soluble resoluble phenol-cardanol-formaldehyde resins were obtained in JSC Uralchimplast (Nizhny Tagil, Russia) with partial replacement of synthetic phenol by 7.5 and 15 wt. % cardanol. The obtained cardanol-containing resins do not differ in properties from *the properties of phenol-formaldehyde resins, traditionally used for the production of wood boards. In the article, as an exploratory study, the influence of two technological factors (the consumption of resin and the degree of substitution of synthetic phenol on cardanol) on the properties of OSB slabs was assessed. For this purpose, a complete two-factor three-level experiment was performed on the Kono compositional plan. A regression analysis of the experimental results showed that, with a confidence level of 0.95, the substitution of synthetic phenol for cardanol to 15 wt. % does not affect the properties of these plates. The resulting phenol-cardanol-formaldehyde resins can be recommended for pilot testing in the production of OSB boards.*

Keywords: OSB; phenolcardanolformaldehyde resins; production; properties.

Введение

Для производства различных древесных композиционных материалов (древесностружечных и древесноволокнистых плит, фанеры, древесно-слоистых пластиков) широко используют в качестве термореактивных полимерных связующих водорастворимые резольные фенолформальдегидные смолы (ФФС). Постоянный рост цен на синтетический фенол, пропорциональный ценам на нефть, приводит к необходимости снижения себестоимости производства ФФС и поиску альтернативных для них адгезивов [1].

Одним из направлений снижения себестоимости ФФС является частичная или полная замена при синтезе смол синтетического фенола на вещества из возобновляемых растительных ресурсов — лигнины [1–7], танин [1, 2], пиролизные масла [1, 8–11] и др. Так, в работах А.А. Варфоломеева, А.Д. Синегибской, А.Ф. Готова установлено [5, 6], что замена при синтезе ФФС фенола на лигнинсодержащие вещества до 40 % не приводит к ухудшению качества смол и позволяет получать фанеру с высоким показателем прочности при скалывании, но только в сухом состоянии. Г.П. Плотникова, Н.П. Плотников, Е.А. Кузьминых [7] показали возможность использования гидролизного лигнина в качестве модификатора фенолформальдегидной смолы для производства клееной фанеры.

Адгезивы на основе жидких резольных фенолформальдегидных смол в большом объеме применяют при получении древесных плит ориентированной структуры из крупноразмерных древесных частиц (OSB, ОСП) [12].

С целью снижения себестоимости производства ФФС, используемых в производстве плит OSB, проводятся исследования по изучению влияния на свойства плит химического состава этих смол и различных технологических факторов. Одним из направлений таких исследований является замена при синтезе ФФС синтетического фенола на вещества из возобновляемых ресурсов (лигнин [3, 4], танин [1], соя [1]), карбамид [13]).

Установлено, что введение карданола в состав резольных фенолформальдегидных смол приводит к заметному улучшению свойств фанеры, древесно-слоистых пластиков, древесностружечных [14] и древесноволокнистых плит [15].

Карданол получают в процессе термического декарбоксилирования анакардиновой кислоты, являющейся главным компонентом жидкости скорлупы орехов кешью [16]. Карданол представляет собой метазамещенный алкилфенол с C_{15} ненасыщенным углеводородным радикалом с количеством двойных связей от одной до трех [17]. Объем его ежегодного мирового производства составляет более 450 тыс. т при меньшей цене по сравнению с синтетическим фенолом.

В данной работе была исследована возможность получения плит OSB с использованием в качестве термореактивного связующего резольных водорастворимых фенолформальдегидных смол, изготовленных с частичной заменой синтетического фенола на карданол.

Экспериментальная часть. В научно-исследовательском центре ПАО «Уралхимпласт» были изготовлены лабораторные образцы фенолкарданолформальдегидных смол с заменой 0; 7,5; 15 мас. % фенола на карданол при мольном соотношении фенолы (фенол + карданол): формальдегид 1:2,33 (марки смол соответственно СФЖ-OSB, СФЖ-OSB 7,5К и СФЖ-OSB 15К). Синтез смол вели в соответствии с действующим на ПАО «Уралхимпласт» технологическим регламентом № 071294, до достижения вязкости по вискозиметру ВЗ-246 30-35 с при 20 °C. Свойства полученных образцов смол представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства фенолформальдегидных смол

Наименование показателя	Результаты испытаний смол, *марка*		
	СФЖ-OSB	СФЖ-OSB 7,5К	СФЖ-OSB 15К
Условная вязкость по ВЗ-246, *с*	31	32	35
Массовая доля нелетучих веществ, *%*	44,5	44,4	44,5
Массовая доля щелочи, *%*	5,54	5,57	5,64
Массовая доля свободного фенола, *%*	0,05	0	0
Массовая доля свободного формальдегида, *%*	0,05	0	0

Полученные образцы смол использовали для изготовления лабораторных образцов плит OSB толщиной 10 мм с плотностью 700–750 кг/м^3.

В качестве стрендов использовали сухую древесную стружку, полученную на предприятии по изготовлению плит OSB (ИП глава КФХ А.Ф. Невзоров, п. Сычево, Курганская область), с абсолютной влажностью 4–5 % с массовой долей древесины хвойных пород 40 % и древесины лиственных пород — 60 %.

Средние размеры стружки составляли: длина 40–80 мм, ширина 20–30 мм, толщина 0,5–0,8 мм.

На каждый слой стружки при формировании древесно-стружечного ковра вручную распыляли расчетное количество смолы с массовым соотношением наружных и внутреннего слоя 50:50. Крупная стружка укладывалась в наружные слои плиты в одном направлении, а более мелкая стружка — во внутренний слой, в перпендикулярном направлении.

После холодной подпрессовки ковра в течение 1 мин при давлении 1 МПа проводили горячее прессование полученного древесностружечного брикета в течение 11 мин при температуре греющих плит пресса 180–190 °С по трехступенчатой диаграмме прессования с максимальным давлением 2 МПа. После завершения горячего прессования полученную плиту OSB выдерживали до испытаний в комнатных условиях в течение 3-х суток.

Результаты экспериментов и их анализ. Для изучения влияния технологических факторов на свойства плит OSB был проведен трехуровневый полный двухфакторный эксперимент по плану, который относится к D-оптимальным планам Коно (план Ко-2).

Планы Коно обладают хорошими статистическими характеристиками и экономны по числу экспериментов [18]. Области изменения входных факторов представлены в табл. 2, план и результаты эксперимента — в табл. 3.

Таблица 2

Области изменения входных факторов

Входные факторы	Натуральные значения входных факторов (Z_i) при их следующих нормализованных значениях (x_i)		
	$x_i = –1$	$x_i = 0$	$x_i = +1$
Расход смолы, Z_1, мас. % сухой смолы от сухой стружки	12	14	16
Степень замещения фенола на карданол в фенолкарданолформальдегидной смоле, Z_2, мас. %	0	7,5	15

Таблица 3

План и результаты эксперимента

Номер опыта	x_1	x_2	Z_1, %	Z_2, %	σ, МПа	S_2, %	S_{24}, %	W_2, %	W_{24}, %
1	+1	+1	16	15	23,8	29	32	70	92
2	–1	+1	12	15	11,4	51	54	90	106
3	+1	–1	16	0	23,6	43	47	87	102
4	–1	–1	12	0	14,3	27	27	88	110
5	+1	0	16	7,5	22,2	29	34	67	86
6	–1	0	12	7,5	20,2	27	28	93	114
7	0	+1	14	15	15,2	35	34	74	92
8	0	–1	14	0	18,3	24	25	91	110
9	0	0	14	7,5	19,5	23	25	90	110

За выходные параметры были взяты следующие свойства плит OSB:

σ — прочность при изгибе по главной оси плиты, *МПа*;

S_2 — разбухание в воде по толщине за 2 ч; *отн. %*;

S_{24} — разбухание в воде по толщине за 24 ч; *отн. %*;

W_2 — водопоглощение за 2 ч; *мас. %*;

W_{24} — водопоглощение за 24 ч; *мас. %*.

Для оценки случайных ошибок измерений свойств плит OSB опыт № 8 был повторен. Результаты статистических расчетов приведены в табл. 4.

Экспериментально-статистическую модель свойства плиты OSB ($\hat{y}$) представляли в виде следующего регрессионного полинома 2-й степени:

$$\hat{y} = b_0 + b_1Z_1 + b_2Z_2 + b_{12}Z_1Z_2 + b_{11}Z_1^2 + b_{22} Z_2^2,$$

где b_0 — свободный член (постоянная регрессии); b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22} — коэффициенты, учитывающие соответственно линейное, парное и квадратичное влияние входных факторов; Z_1, Z_2, — натуральные значения входных факторов.

Для полученных результатов эксперимента (табл. 3) был проведен классический регрессионный анализ с доверительной вероятностью 0,95 с использованием программы MS Excel при последовательном пошаговом исключении из полинома членов с коэффициентами, имеющими наибольшее значение статистического параметра «Р-значение» [19], превышающее величину 0,05.

Были получены следующие адекватные уравнения регрессии со значимыми регрессионными коэффициентами:

$\sigma = 1,3Z_1$ (R^2 = 0,980);

$S_2 = 7,8Z_1 – 0,39Z_1^2$ (R^2 = 0,952);

$S_{24} = 8,7Z_1 – 0,45Z_1^2$ (R^2 = 0,955);

$W_2 = 16Z_1 – 0,71Z_1^2$ (R^2 = 0,993);

$W_{24} = 19,1Z_1 – 0,83Z_1^2$ (R^2 = 0,996).

Результаты регрессионного анализа показали, что в исследованной факторной области с увеличением расхода смолы (независимо от содержания в ней карданола) улучшаются регламентируемые межгосударственным и российским стандартами [12, 13] показатели прочности плит OSB при изгибе и разбухании в воде за 24 ч (рис. 1).

Таблица 4

Статистические параметры результатов измерений свойств плит OSB

Статистические параметры	Свойства плит OSB				
	σ, МПа	S_2, %	S_{24}, %	W_2, %	W_{24}, %
Среднее арифметическое значение свойства плиты OSB ($\bar{y}$)	18	24	26	91	110
Выборочное абсолютное стандартное отклонение среднего арифметического значения ($S_{\bar{y}}$)	2	2	2	6	5

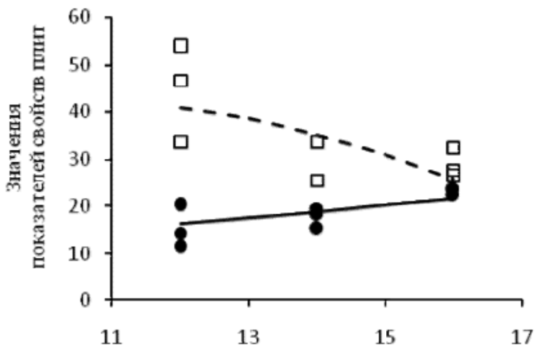


Рис. 1. Зависимости свойств плит OSB от расхода смол и экспериментальные данные: ─ , ● (σ, МПа); - - , □ (S_{24}, %)

Таким образом, замена при синтезе смол синтетического фенола на карданол до 15 мас. % не ухудшает изученные свойства плит OSB. Полученные водорастворимые резольные фенолкарданолформальдегидные смолы могут найти практическое применение при производстве плит ориентированной структуры из крупноразмерных древесных частиц.

Заключение

1. Результаты регрессионного анализа зависимости свойств плит OSB с водорастворимыми резольными фенолформальдегидными связующими от значений двух технологических факторов (расхода смолы и доли карданола в фенолах смолы) показали, что с доверительной вероятностью 0,95 замена при синтезе смол синтетического фенола на карданол до 15 мас. % не влияет на свойства этих плит.

2. По результатам проведенных исследований можно рекомендовать полученные фенолкарданолформальдегидные смолы к опытно-промышленной проверке при производстве плит OSB.

Литература

1. Sellers T. Jr. Wood adhesive innovations and applications in North America // Forest Prod. J. 2001. Vol. 51. P. 12-22.

2. Pizzi A. Handbook of Adhesive Technology: Second Edition, Revised and Expanded. New York, Basel: CRC Press, 2003. P. 672.

3. Oh Y.S. Evaluation of phenol–formaldehyde OSB resins modified with lignin residues from acid hydrolyzed waste newsprint // Forest Prod. J. 1994. Vol. 44. P. 25-29.

4. Sukhbaatar B. Use of lignin separated from bio-oil in oriented strand board binder phenol-formaldehyde resins // BioResources. 2009. Vol. 4. P. 789-804.

5. Гоготов А.Ф., Варфоломеев А.А., Синегибская А.Д., Ерзикова Л.А., Каницкая Л.В., Рохин А.В. Способ получения лигнофенолоформальдегидной смолы: пат. 2423390 Рос. Федерация. № 2009129419/04; завл. 30.07.09; опубл. 07.10.11, Бюл. № 19.

6. Варфоломеев А.А. Разработка экологически безопасных феноло-формальдегидных смол, модифицированных техническими лигнинами: автореф. дис. … канд. хим. наук. Красноярск, 2009. 20 с.

7. Плотникова Г.П. Применение гидролизного лигнина в производстве древесно-полимерных композитов // Системы Методы Технологии. 2013. № 4. С. 133-138.

8. Lu K.T. Substitution of phenol in phenol-formaldehyde (PF) resins by wood tar for plywood adhesives // Holzforschung. 2013. Vol. 67, № 4. P. 413-419.

9. Chaouch M. Bio-oil from whole-tree feedstock in resol-type phenolic resins // J. Appl. Polym. Sci. 2014. Vol. 131, № 6. 40014 p.

10. Грачев А. Н. Прочность клеевого шва резольной фенолформальдегидной смолы при модификации продуктами быстрого пиролиза древесины // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2014. Т. 17, № 16. С. 28-30.

11. Lee Y.Y. Properties of molding plates made with various matrices impregnated with PF and liquefied wood-based PF resins // Holzforschung. 2014. Vol. 68, № 1. P. 37-43.

12. Gardziella A. Phenolic Resins: Chemistry, Applica-tions, Standardization, Safety and Ecology // Springer Science & Business Media. 2013. P. 566.

13. Oh Y.S. Properties of oriented strandboard bonded with phenol–urea–formaldehyde resin // J. Tropical Forest Sci. 2015. Vol. 27. P. 222–226.

14. Шишлов О.Ф. Получение и свойства древесных композитов с новыми карданолсодержащими адгезивами: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2015. 385 с.

15. Баулина Н.С. Получение и свойства древесноволокнистых плит с фенолкарданолформальдегидными адгезивами // Клеи, герметики, технологии. 2016. № 6. С. 29-34.

16. Risfaheri T.T. Isolation of cardanol from cashew nut shell liquid using the vacuum distillation method // Indonesian J. of Agriculture. 2009. № 2. P. 11-20.

17. Tyman J.H.P. Non-isoprenoid long chain phenols // Chem. Soc. Rev. 1979. № 8. P. 499-537.

18. Рузинов Л.П. Статистические методы оптимизации химических процессов. М.: Химия, 1972. 200 с.

19. Вадзинский Р. Статистические вычисления в среде Excel. СПб.: Питер, 2008. 608 с.

20. ГОСТ 32567-2013. Плиты древесные с ориентированной стружкой. Технические условия [Электронный ресурс] Техн. условия. Введ.01.07.2014. Доступ из справ.- правовой системы «Консультант Плюс».

21. ГОСТ Р56309-2014. Плиты древесные строительные с ориентированной стружкой. Технические условия [Электронный ресурс]. Введ. 01.07.2015. Доступ из справ.- правовой системы «Консультант Плюс».

References

1. Sellers T.Jr. Wood adhesive innovations and applications in North America // Forest Prod. J. 2001. Vol. 51. P. 12-22.

2. Pizzi A. Handbook of Adhesive Technology: Second Edition, Revised and Expanded. New York, Basel: CRC Press, 2003. P. 672.

3. Oh Y.S. Evaluation of phenol-formaldehyde OSB resins modified with lignin residues from acid hydrolyzed waste newsprint // Forest Prod. J. 1994. Vol. 44. P. 25-29.

4. Sukhbaatar B. Use of lignin separated from bio-oil in oriented strand board binder phenol-formaldehyde resins // BioResources. 2009. Vol. 4. P. 789-804.

5. Gogotov A.F., Varfolomeev A.A., Sinegibskaya A.D., Erzikova L.A., Kanitskaya L.V., Rokhin A.V. Method of produsing lingo-phenol-formaldehyde resin: pat. 2423390 Ros. Federatsiya. № 2009129419/04; zavl. 30.07.09; opubl. 07.10.11, Byul. № 19.

6. Varfolomeev A.A. Development of ecologically safe phenol-formaldehyde resins modified with technical lignins: avtoref. dis. … kand. khim. nauk. Krasnoyarsk, 2009. 20 p.

7. Plotnikova G.P. Use of hydrolized lignin in wood-polymer composites production // Systems Methods Technologies. 2013. № 4. P. 133-138.

8. Lu K.T. Substitution of phenol in phenol-formaldehyde (PF) resins by wood tar for plywood adhesives // Holzforschung. 2013. Vol. 67, № 4. P. 413-419.

9. Chaouch M. Bio-oil from whole-tree feedstock in resol-type phenolic resins // J. Appl. Polym. Sci. 2014. Vol. 131, № 6. P. 40014.

10. Grachev A.N. Durability of the glue seam of resole phenol-formaldehyde resin modified with products pyrolysis of wood // Herald of Kazan Technological University (KNRTU). 2014. T. 17, № 16. P. 28-30.

11. Lee Y.Y. Properties of molding plates made with various matrices impregnated with PF and liquefied wood-based PF resins // Holzforschung. 2014. Vol. 68, № 1. P. 37-43.

12. Gardziella A. Phenolic Resins: Chemistry, Applica-tions, Standardization, Safety and Ecology // Springer Science & Business Media. 2013. P. 566.

13. Oh Y.S. Properties of oriented strandboard bonded with phenol-urea-formaldehyde resin // J. Tropical Forest Sci. 2015. Vol. 27. P. 222-226.

14. Shishlov O.F. Preparation and properties of wood composites with new cardanol containing adhesives: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2015. 385 p.

15. Baulina N.S. Preparation and properties of wooden fiberboards with phenol cardanol formaldehyde adhesives // Adhesives. Sealing. Technologies. 2016. № 6. P. 29-34.

16. Risfaheri T.T. Isolation of cardanol from cashew nut shell liquid using the vacuum distillation method // Indonesian J. of Agriculture. 2009. № 2. P. 11-20.

17. Tyman J.H.P. Non-isoprenoid long chain phenols // Chem. Soc. Rev. 1979. № 8. P. 499-537.

18. Ruzinov L.P. Statistical methods optimization of chemical processes. M.: Khimiya, 1972. 200 p.

19. Vadzinskii R. Statistical calculations in the environment of Excel. SPb.: Piter, 2008. 608 p.

20. GOST 32567-2013. Wood-based panels with oriented chips. Technical conditions. [Elektronnyi resurs]. Vved.01.07.2014. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tant Plyus».

21. GOST R56309-2014. Wood-based construction boards with oriented chips. Technical conditions. [Elektronnyi resurs]. Vved. 01.07.2015. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tant Plyus».

УДК 674.061 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-105-109

Исследование покоробленности пиломатериалов лиственницы даурской от действия начальных напряжений и собственного веса

А.Ю. Охлопкова

ООО «Азия Лес» пер. Облачный 78а, 11, Хабаровск, Россия
anna.okhlopkova@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2761-374X
Статья поступила 10.12.2017, принята 15.01.2018

В статье представлен опыт изучения влияния начального напряжения и силы тяжести пиломатериалов на значения величины их прогиба. Авторами разработана методика исследования и предложены исследовательские установки для проведения наблюдений простых продольных покоробленностей по кромке и пласти пиломатериалов. Покоробленность после распиловки и сушки оказывает существенное влияние на экономическую эффективность лесопильно-деревообрабатывающих предприятий и объемно-ценностный выход пиломатериалов, особенно если речь идет о трудносохнущих и плотных породах древесины, таких как даурская лиственница. По этой причине объектом исследования были выбраны пиломатериалы из даурской лиственницы, произрастающей в Якутии. По существующим гипотезам, на коробление пиломатериалов оказывают влияния различные факторы, такие как особенности микро- и макростроения древесных пород, условия произрастания и внешние воздействия, технология и степень обработки пиломатериалов и многое другое. Для выявления и оценки действия начальных напряжений на величину покоробленности были выбраны свежеизготовленные пиломатериалы и собраны простейшие установки для проведения исследований непосредственно на производственной площадке. Полученный в результате проведенных наблюдений массив данных был проанализирован с учетом выявленных особенностей объекта исследования. Экспериментально подтвержден факт неодинаковой величины прогиба пиломатериалов по внутренней и наружной пласти, что является объективным свидетельством наличия начальных напряжений. По результатам исследования величины коробления возможно получение математических моделей для численного моделирования естественной кривизны пиломатериалов и последующего использования этих моделей с целью снижения затрат на производство сухой пилопродукции.

Ключевые слова: древесина; даурская лиственница; начальные напряжения; пиломатериалы; прогиб; коробление.

Research of Dahurian larch sawmill warping cased by of initial stresses and its own weight

A.Yu. Okhlopkova

"Asia Les" Ltd; 78a, 11, Oblachniy Per., Khabarovsk, Russia
anna.okhlopkova@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2761-374X
Received 10.12.2017, accepted 15.01.2018

The article presents the justification for carrying out studies of the influence of the initial stress and gravity on the value of the deflection of sawn timber. The authors developed research methods and research facilities for observing simple longitudinal deformations along the edge and plastics of the saw materials. The fragmentation after sawing and drying has a significant impact on the economic efficiency of sawmilling and woodworking enterprises and the volume-value yield of sawn timber, especially when it comes to hard-drying and dense wood species, such as Dahurian larch. For this reason, timber from Daurian larch growing in Yakutia was chosen as the object of research. According to existing hypotheses, various factors influence the warping of sawn timber, such as the features of micro- and macrostructure of tree species, the conditions of growth and external influences, the technology and the degree of processing of sawn timber, and much more. To identify and evaluate the effect on the amount of distortion of initial stresses, freshly prepared sawn timber was selected and simple installations were assembled for research directly on the production site. The data obtained as a result of the observations was analyzed taking into account the revealed features of the object of investigation. The fact of the uneven amount of deflection of sawn timber along the inner and outer plates is experimentally confirmed, which is an objective evidence of the presence of initial stresses. Based on the results of the warp value study, it is possible to obtain mathematical models for numerical modeling of the natural curvature of sawn timber and subsequent use of these models in order to reduce the costs of production of dry sawmill.

Key words: wood; Dahurian larch, initial stresses; sawmill; deflection; warping.

Введение

Многими авторами [1–8] отмечается существенное влияние внутренних напряжений на формостабильность лесоматериалов (см. рис. 1). При этом, как продемонстрировано на рисунках, бревна после расхлыстовки и пиломатериалы после распиловки изменяют форму и растрескиваются, т. е. снижают свои качественные характеристики. Степень растрескивания и покоробленности зависит от многих факторов, таких как микро- и макростроение и генетические особенности породы, условия произрастания и характеристики внешнего воздействия, технология и степень обработки, включая влажностные показатели. Например, пиломатериалы из лиственницы даурской подвержены значительному короблению в процессе сушки и имеют высокие показатели отбраковки готовой продукции по всем видам покоробленности. С точки зрения повышения эффективности производства лиственничных пиломатериалов [9] практический интерес представляют изучение и разработка технологических решений для снижения брака по причине покоробленности.

Наше исследование направлено на сбор и анализ данных характера покоробленностей пиломатериалов из лиственницы даурской, произрастающей в Якутии, для дальнейшего использования результатов при разработке технологических решений по повышению качественного выхода продукции лесопильных заводов.

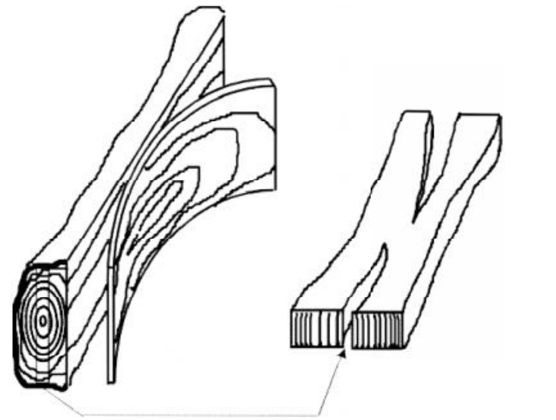
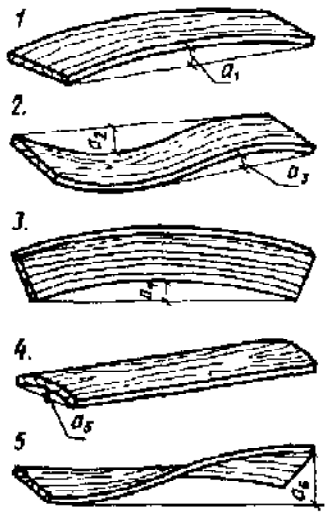


Рис. 1. Растрескивание и коробление лесоматериалов [4]

Методика исследования. Согласно ГОСТ 2140-81 «Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения», покоробленность — это изменение формы сортимента при выпиловке, сушке или хранении. Различают продольную покоробленность по пласти, простую и сложную покоробленность, продольную покоробленность по кромке, поперечную покоробленность и крыловатость. В настоящем исследовании измерялись величины прогибов простых покоробленностей по длине по пласти и по кромке.

Согласно ГОСТ 26002-83, ГОСТ 8486-86, ГОСТ 9302-83, Nordic Timber и другим международным стандартам на хвойные пиломатериалы, продольную покоробленность по пласти и по кромке измеряют по величине стрелы прогиба сортимента (рис. 2).

Основываясь на собственном опыте работы автора на лесопильном предприятии, при измерении покоробленности происходит некоторое уменьшение величины стрелы прогиба от действия собственного веса доски, особенно у свежевыпиленных лиственничных пиломатериалов ввиду их высокой плотности и влажности. Кроме того, практикам хорошо известно, что продольное коробление по пласти преимущественно происходит с прогибом по внутренней пласти, т. е. существует разница в величине прогиба пиломатериала в зависимости от пластей. При ориентации наружной пласти вниз прогиб преимущественно увеличивается. Данные наблюдения подтверждаются гипотезой о распределении начальных напряжений в стволе дерева и их последующем действии при выпиливании пиломатериалов [10–15]. На рис. 3 продемонстрировано действие моментов сил от начальных напряжений и нагрузки от собственного веса доски.



1 - простая,
2 - сложная (z = a_2 при $a_2 > a_3$, z = a_3 при $a_3 > a_2$),
3 - продольная по кромке,
4 - поперечная, 5 - крыловатость

Рис. 2. Измерение покоробленности согласно ГОСТ 2140-81

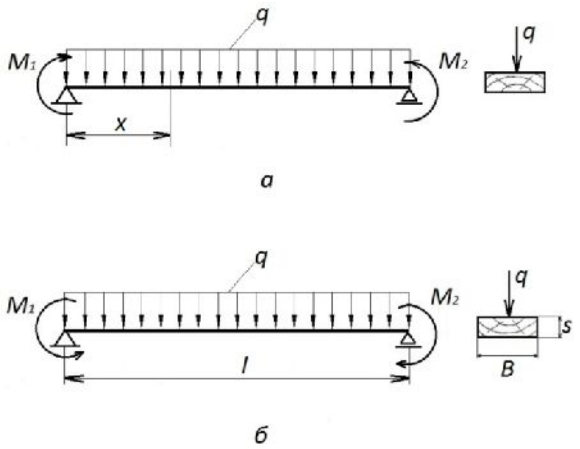


Рис. 3. Схема нагружения доски собственным весом и моментами от начальных напряжений, выходящих на торцы доски: *а* — при верхнем расположении наружной пласти; *б* — при нижнем расположении наружной пласти

С точки зрения механики действия сил на объект исследования и цели исследования, необходимо разработать установку, на которой существовала бы возможность нивелировать действие силы тяжести и оценить непосредственно прогиб от действия моментов сил начальных напряжений.

Для оценки количественных показателей прогиба пиломатериалов от действия начальных напряжений в зависимости от положения выпиленного пиломатериала, а также его ориентации в бревне были собраны две установки.

Установка № 1 включала:

• поверхность базирования из строганной лиственницы даурской;

• натянутую нить.

Установка № 2 включала:

• опорные бруски из лиственницы даурской;

• натянутую нить.

Первая установка (со строганной поверхностью базирования) служила для нахождения стрелы прогиба по пласти при базировании доски на кромке и стрелы прогиба по кромке — при базировании на пласти. Вторая установка служила для определения стрелы прогиба при ориентации доски сначала наружной пластью вверх, затем наружной пластью вниз; аналогично, в двух положениях, производились замеры прогибов по кромке.

Наблюдения проводились на пиломатериалах естественной влажности длиной 5,1 м, выпиленных из бревен лиственницы даурской диаметром 18–28 см: сечением 54x156 — 131 шт.; сечением 30x130 — 130 шт. Исследование включало последовательное перемещение досок с установки № 1 на установку № 2 с занесением результатов измерений и фотографированием торцов для определения положения доски в бревне. Бревна предварительно были промаркированы и размечены для обеспечения точного определения координат досок. Пиловочные бревна были получены из лиственницы даурской, произрастающей в Якутии, и отсортированы в соответствии с требованиями 1-го и 2-го сорта по ГОСТ 22298-76. Раскрой пиловочных бревен осуществлялся на фрезерно-брусующем многопильном станке R200 производства компании HewSaw стандартными режимами пиления. Исследование проводилось на производственной площадке ООО «Алмас» (г. Якутск).

Результаты исследования. В результате проведенных наблюдений был собран массив данных, полученных на двух установках для одних и тех же досок. Статистическая обработка массива данных проводилась при помощи специального программного обеспечения «Статистика» и «Origin Pro». Были сформированы плотности распределения величин покоробленности в долевом выражения для различных зависимостей.

На рисунках ниже представлены графики распределения величины покоробленности по пласти и по кромке, выраженные в долях, при замерах на установке № 1 (с минимизацией воздействия собственного веса доски) и установке № 2 (под действием собственного веса доски) на прогиб для двух сечений пиломатериалов в зависимости от диаметра бревна, соотношения радиуса ядровой древесины к радиусу бревна и смещения доски относительно сердцевины.

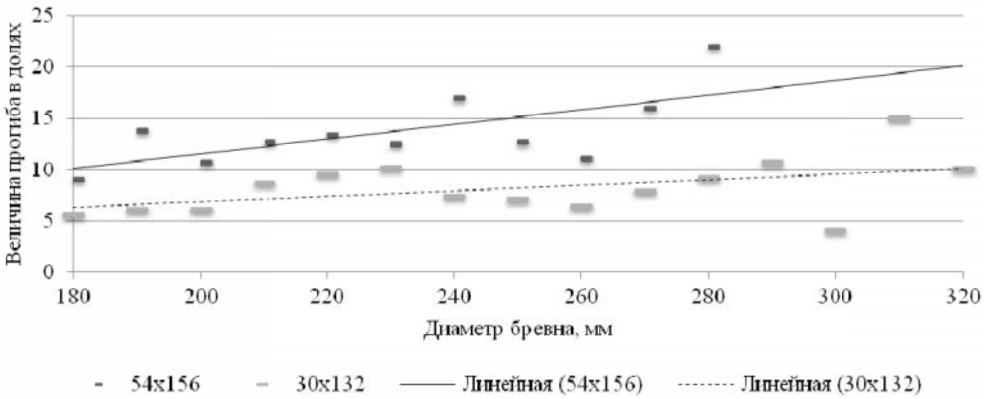


Рис. 4. Покоробленность по пласти при базировании на левой кромке на установке № 1 в зависимости от диаметра бревна

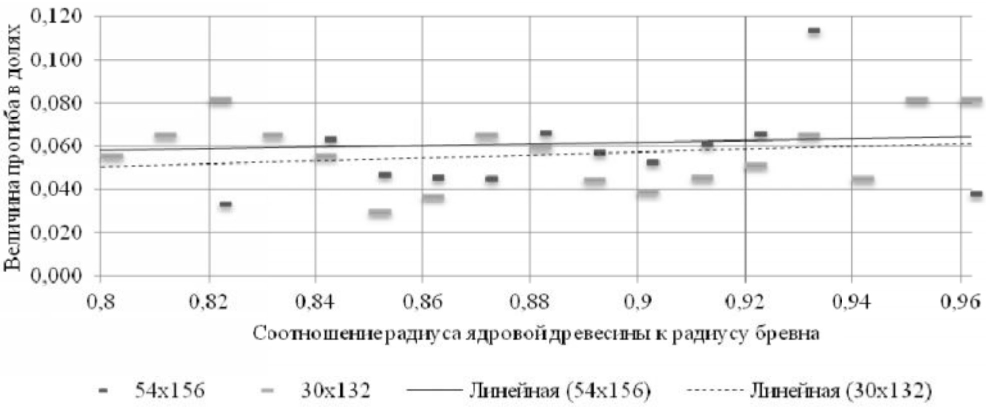


Рис. 5. Покоробленность по кромке при базировании на внутренней пласти на установке № 1 в зависимости от отношения радиуса ядровой древесины к радиусу бревна

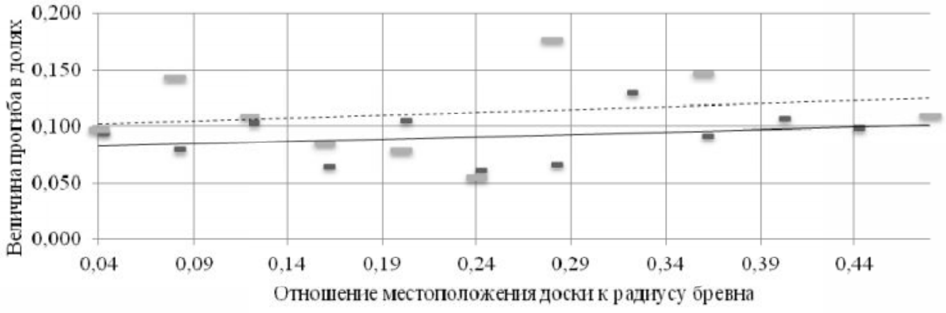


Рис. 6. Покоробленность по кромке при базировании на внутренней пласти на установке № 1 в зависимости от смещения доски относительно сердцевины

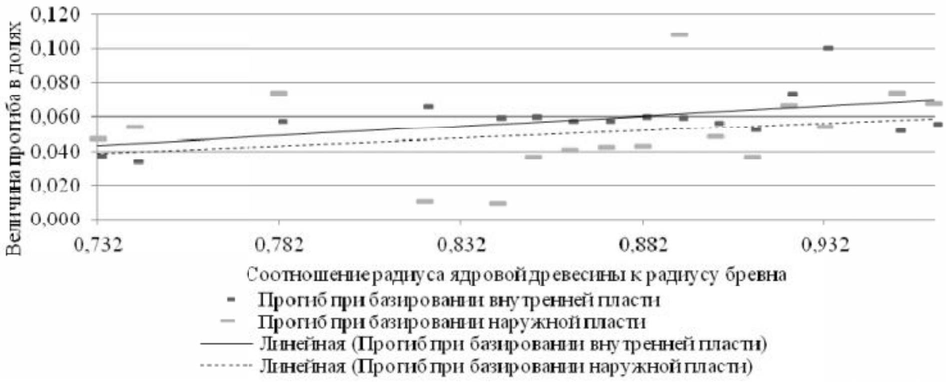


Рис. 7. Покоробленность по пласти под действием собственного веса, в зависимости от отношения радиуса ядровой древесины к радиусу бревна, для пиломатериалов сечением 54х156

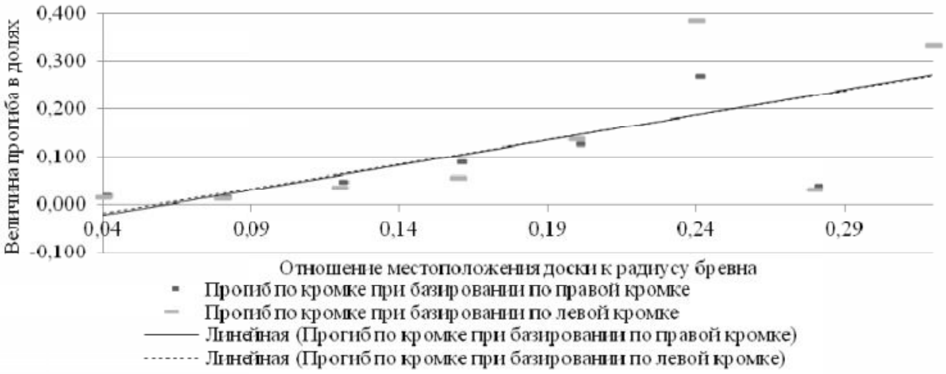


Рис. 8. Покоробленность по кромке под действием собственного веса в зависимости от смещения доски сечением 54х156 относительно сердцевины

При среднем значении соотношения радиуса заболони к радиусу бревна 0,905 показатели прогиба по пласти от действия начальных напряжений у досок составили:

- из центрального постава сечением 54х156 — 13 мм, максимальное — 39 мм;
- из бокового постава сечением 30х130 среднее — 8 мм, максимальное — 25 мм.

Среднее значение прогиба по кромке от действия начальных напряжений у досок:

- из центрального постава сечением 54х156 — 5,5 мм, максимальное — 18 мм;
- из бокового постава сечением 30х130 среднее — 3 мм, максимальное — 14 мм.

Среднее значение прогиба по пласти от действия начальных напряжений и силы тяжести у досок из центрального постава сечением 54х156 составило:

- при базировании на внутренней пласти среднее — 32 мм, максимальное — 81 мм;
- при базировании на наружной пласти среднее — 9 мм, максимальное — 28 мм;
- при базировании на правой кромке среднее — 5,3 мм; максимальное — 20 мм;
- при базировании на левой кромке среднее — 5,6 мм, максимальное — 18 мм.

У досок из бокового постава сечением 30х130 составило:

- при базировании на внутренней пласти среднее — 61 мм, максимальное — 127 мм;
- при базировании на наружной пласти среднее — 53 мм, максимальное — 129 мм;
- при базировании на правой кромке среднее — 4,2 мм; максимальное — 14 мм;

• при базировании на левой кромке среднее — 3,8 мм, максимальное — 14 мм.

Выводы

1. Зафиксированы разные величины прогиба для одних и тех же пиломатериалов при наблюдении на установках № 1 и 2 для одних и тех же досок.

2. Существует разница в величине прогиба по внутренней и по наружной пласти пиломатериалов.

3. Величина прогиба от действия начальных напряжений имеет большее значение для более толстых и широких пиломатериалов как по пласти, так и по кромке.

4. Величина прогиба по кромке имеет приблизительно равное значение для различных сечений пиломатериалов.

5. Величина прогиба имеет тенденцию к увеличению при смещении сечения доски относительно положения сердцевины.

6. Величина прогиба имеет тенденцию к увеличению при увеличении соотношения радиуса ядровой древесины к радиусу бревна.

Литература

1. Okura S., Ozawa K., Takagaki K . Twisting Warp of Boards in relation to Fiber Direction // Japan Woord Res. Soc.,1967. № 9 (4).

2. Nicholson J.E. A rapid method for estimating longitudinal growth stresses in logs // Wood Science and Technology. 1971. № 5. P. 40-48.

3. Wilhelmy V., Kübler H. Stresses and checks in log ends from relieved growth stresses // Wood Sci. 1973. № 6. P. 136–142.

4. Cassens D.L., Serrano J.R. Growth stress in hardwood timber // Proceedings of the 14 th Central Hardwood Forest Conference, 16-19 March. Wooster, Ohio. 2004.

5. James K. Dynamic loading of trees //Journal of Arboriculture. 2003. № 29 (3): May.

6. Boyd J.D. Tree growth stresses. I. Growth stress evaluation // Australian Journal of Scientific Research. 1950. № 3. P. 270-931.

7. Кузнецов А.И. Внутренние напряжения в древесине. Л.: Гослесбумиздат, 1950.

8. Глухих В.Н., Акопян А.Л. Начальные напряжения в древесине: моногр. СПб.: СПбГАСУ, 2016. 95 с.

9. Докторов И.А., Охлопкова А.Ю. К вопросу оптимизации объемно-ценностного выхода пиломатериалов из древесины лиственницы даурской // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение: материалы II Всерос. науч.-практической конф. Якутск, 2011. С. 41-44.

10. Banks C.H. Sawing and Stacking Timber to reduce Warp // Timber Technologie. 1966. № 3. P. 36-39.

11. Родионов С.В., Маятин А.А., Зонов Е.Г. Профило-граф для изучения величины коробления заготовок // Деревообрабатывающая промышленность. 1956. № 11. С. 24-27.

12. Стриха И.А. Причина деформаций деталей из древесины и способы ее уменьшения // Деревообрабатывающая и лесохимическая промышленность. 1954. № 7. С.12-16.

13. Glukhikh V.N. Change in wood strength under static bending and compression along fibers in the process of tree growth // Architecture and Engineering. 2017. Vol. 2, Is. 1. P. 31-55.

14. Глухих В. Н., Черных А. Г. Анизотропия древесины. Технологический аспект: моногр. СПб.: СПбГАСУ, 2013. 240 с.

15. Глухих В.Н., Охлопкова А.Ю. Формирование кармашков в стволах деревьев лиственницы даурской // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2017. № 5. С. 35-52.

References

1. Okura S., Ozawa K., Takagaki K. Twisting Warp of Boards in relation to Fiber Direction // Japan Woord Res. Soc., 1967. № 9 (4).

2. Nicholson J.E. A rapid method for estimating longitudinal growth stresses in logs // Wood Science and Technology. 1971. № 5. P. 40-48.

3. Wilhelmy V., Kübler H. Stresses and checks in log ends from relieved growth stresses // Wood Sci. 1973. № 6. P. 136-142.

4. Cassens D.L., Serrano J.R. Growth stress in hardwood timber // Proceedings of the 14 th Central Hardwood Forest Conference, 16-19 March. Wooster, Ohio. 2004.

5. James K. Dynamic loading of trees // Journal of Arboriculture. 2003. № 29 (3): May.

6. Boyd J. D. Tree growth stresses. I. Growth stress evaluation // Australian Journal of Scientific Research. 1950. № 3. P. 270-931.

7. Kuznetsov A.I. Internal stresses in wood. L.: Goslesbumizdat, 1950.

8. Glukhikh V.N., Akopyan A.L. Initial stresses in wood: monogr. SPb.: SPbGASU, 2016. 95 p.

9. Doktorov I.A., Okhlopkova A.Yu. On the optimization of the volume-value output of sawn timber from Dahurian larch wood // Sovremennye problemy stroitel'stva i zhizneobespecheniya: bezopasnost', kachestvo, energo- i resursosberezhenie: materialy II Vseros. nauch.-prakticheskoi konf. Yakutsk, 2011. P. 41-44.

10. Banks C.H. Sawing and Stacking. Timber to reduce Warp // Timber Technologie. 1966. № 3. P. 36-39.

11. Rodionov S.V., Mayatin A.A., Zonov E.G. Prophylograph for studying the value of warping of blanks // Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry). 1956. № 11. P. 24-27.

12. Strikha I.A. The cause of deformation of wood components and ways to reduce it // Derevoobrabatyvayushchaya i lesokhimicheskaya promyshlennost'. 1954. № 7. P. 12-16.

13. Glukhikh V.N. Change in wood strength under static bending and compression along fibers in the process of tree growth // Architecture and Engineering. 2017. Vol. 2, Is. 1. P. 31-55.

14. Glukhikh V.N., Chernykh A.G. Anisotropy of wood. Technological aspect: monogr. SPb.: SPbGASU, 2013. 240 p.

15. Glukhikh V.N., Okhlopkova A.Yu. Resin Pocket Formation in Tree Stems of Dahurian Larch // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2017. № 5. P. 35-52.

УДК 630*8 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-110-115

Факторы доступности древесных ресурсов: анализ влияния на ключевые критерии

А.П. Мохирев[1a], М.О. Позднякова[1b], О.А. Куницкая[2c], И.В. Григорьев[2d]

[1]Лесосибирский филиал Сибирского государственного университета науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, ул. Победы 29, Лесосибирск, Россия
[2]Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Сергеляхское шоссе 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)
[a]ale-mokhirev@yandex.ru, [b]m_o_pozdnyakova@mail.ru, [c]ola.ola07@mail.ru, [d]silver73@inbox.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-1692-3323, [b]https://orcid.org/0000-0003-2015-8246,
[c]https://orcid.org/0000-0001-8542-9380, [d]https://orcid.org/0000-0002-5574-1725
Статья поступила 29.01.2018, принята 8.02.2018

В статье рассмотрены результаты факторного анализа доступности древесных ресурсов методом экспертных оценок. Данному вопросу посвящено множество трудов отечественных и зарубежных ученых, однако на сегодняшний день эта тема остается изученной лишь фрагментарно, для предлагаемых методик характерна односторонность оценки. Целью исследования является выявление и ранжирование факторов, изменение которых оказывает наибольший эффект на доступность древесных ресурсов. Авторы предлагают выделить ее основные виды и дают характеристики экологической, технологической, технической, транспортной и экономической доступности. В рамках статьи отражены наиболее значимые результаты экспертной оценки факторов, оказывающих влияние на доступность древесных ресурсов (пошаговое выполнение с ранжированием и нормализацией опущены). Выделены ключевые критерии оценки доступности, представлены результаты анализа влияния отдельных факторов посредством обозначенных критериев. Приводятся результаты сравнения показателей весомости каждого фактора и широты их влияния, разграничены управляемые и неуправляемые факторы. Выделена группа факторов, на которые рекомендуется нацелить оптимизационные мероприятия для получения максимального эффекта. Полученные рекомендации могут быть использованы для принятия управленческих решений по оптимизации лесозаготовительного процесса в условия ограниченности ресурсов.

Ключевые слова: доступность древесных ресурсов; факторы доступности древесных ресурсов; критерии оценки доступности древесных ресурсов.

Factors of availability of wood resources: analysis of the impact on key criteria

A.P. Mokhirev[1a], M.O. Pozdnyakova[1b], O.A. Kunickaya[2c], I.V. Grigorev[2d]

[1]Lesosibirsk Branch of Siberian State University of Science and Technology under name of M.F. Reshetnev; 29, Pobedy St., Lesosibirsk, Russia
[2]Yakutsk State Agricultural Academy; 3 km, 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Russia
[a]ale-mokhirev@yandex.ru, [b]m_o_pozdnyakova@mail.ru, [c]ola.ola07@mail.ru, [d]silver73@inbox.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-1692-3323, [b]https://orcid.org/0000-0003-2015-8246,
[c]https://orcid.org/0000-0001-8542-9380, [d]https://orcid.org/0000-0002-5574-1725
Received 29.01.2018, accepted 8.02.2018

The article highlights the results of factor analysis of the availability of wood resources by the method of expert assessments. The issue of assessing the availability of wood resources has been the subject of many works of domestic and foreign scientists, but today this topic remains fragmented, and the one-sidedness of the evaluation is characteristic for the proposed methods. The purpose of this study is to identify and rank the factors whose variation has the greatest effect on the availability of wood resources. The authors proposed the allocation of the main types of accessibility of wood resources: ecological, technological, technical, transport, economic, their characteristics are given. Within the framework of the article the main results of the expert evaluation of the factors influencing the availability of wood resources are reflected (step-by-step implementation with ranking and normalization are omitted). Key criteria for assessing the availability of wood resources are identified. The results of the analysis of the influence of individual factors on the availability of wood resources by means of the indicated criteria are presented. Further in the article results of comparison of indicators of weight of each factor and breadth of their influence are resulted. Managed and unmanaged factors are also differentiated. As a result, a group of factors has been singled out, which are recommended to focus optimization measures for obtaining maximum effect. These recommendations can be used to make managerial decisions to optimize the logging process in conditions of limited resources.

Keywords: availability of wood resources; factors of availability of wood resources; criteria for assessing the availability of wood resources.

Введение

Развитие отечественного лесопромышленного комплекса признается одним из приоритетных направлений работы органов власти как на региональном, так и на федеральном уровне (Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2020 года). Лесная отрасль представляется сложным и спорным объектом для инвестиций и развития бизнеса, поскольку при значительных запасах лесных ресурсов очень остро стоит вопрос об их доступности для освоения.

На сегодняшний день вопрос о доступности древесных ресурсов освещен в трудах многих отечественных и зарубежных ученых, предлагаются различные алгоритмы сравнения участков лесного фонда, методики подсчета ренты и стоимости лесовосстановления, формулы для определения плановой рентабельности по участку и др. [1–5]. Однако проблема комплексной оценки доступности древесных ресурсов остается изученной фрагментарно. Другими словами, авторы предлагают методики оценки доступности древесных ресурсов, ориентированные только на определение конкретных показателей (например, стоимость аренды лесного участка, рентабельность выпускаемой продукции, дальность вывозки и т. д.); исходя из значения данного показателя и определяется доступность древесных ресурсов [2–4]. Такой подход не обеспечивает комплексность оценки, поэтому не может считаться эффективным. В данном исследовании предлагается рассматривать доступность древесных ресурсов как совокупность факторов, сумма значений которых в итоге складывается в оценку доступности древесных ресурсов. При этом необходимо учитывать, что на практике количество факторов, влияющих на показатель, может быть бесконечно большим, поэтому среди них следует выявлять наиболее значимые.

Цель исследования состоит в выявлении и ранжировании факторов, изменение которых оказывает наибольший эффект на доступность древесных ресурсов.

Термин «доступность древесных ресурсов» зачастую используют для обозначения экономической эффективности промышленного освоения лесов, таким образом подменяя его термином «экономическая доступность» [6]. Однако этот критерий более обширен и включает в себя несколько последовательных взаимосвязанных составляющих, а именно: определение экологической, технологической, технической, транспортной и экономической доступности. Таким образом, экономическая доступность является только составной частью этого понятия.

Экологическая доступность древесных ресурсов обусловлена нормативными ограничениями, которые накладываются на пользование лесом. Они связаны с охраной естественных природных систем и экологических функций леса. Согласно эти ограничениям определенные лесные участки могут полностью или частично изымать из промышленного оборота. Экологическая доступность является первичной, поскольку экологический запрет на вырубку делает дальнейшую оценку доступности участка бессмысленной [7].

Технологическая доступность древесных ресурсов заключается в том, что древесные ресурсы возможно освоить определенной технологией в заданный момент времени. При использовании другой технологии рассматриваемый ресурс может быть недоступен [4, 7]. Данный вид доступности относится к определенному виду заготавливаемой древесной продукции. Так, например, при использовании технологии по заготовке круглых лесоматериалов будет недоступна продукция в виде щепы.

Техническая доступность древесных ресурсов — это соответствие системы машин, имеющихся на вооружении у лесозаготовителя, природно-производственным условиям, а именно применяемой технологии, почвенно-грунтовым и размерно-качественным характеристикам участка лесного фонда и др.

Транспортная доступность древесных ресурсов подразумевает возможность доставки продукции лесозаготовки до потребителя в поставленный срок при текущем уровне развития лесной инфраструктуры и технического оснащения лесозаготовителя. Данный вид доступности тесно связан с технологической и технической доступностью.

Заключительная составляющая процесса оценки доступности древесных ресурсов — экономическая. Под *экономической доступностью* древесного ресурса понимается такое соотношение стоимости реализованной лесопродукции и затрат на ее заготовку и транспортировку до потребителя, которое обеспечит необходимый уровень рентабельности [6, 7]. Из приведенного анализа можно сделать вывод, что транспортный, технологический и технический аспекты можно косвенно отнести к экономической доступности древесных ресурсов, поскольку все они могут быть решены посредством определенных финансовых вложений. Так, например, транспортно недоступный участок станет доступным при строительстве новой автомобильной или железной дороги, а технико-технологические несоответствия решаются модернизацией и обновлением парка машин.

Таким образом, наиболее точно термин «доступность древесных ресурсов» можно определить как возможность экологически безопасной и экономически эффективной заготовки определенного вида древесной продукции при использовании определенной техники и технологии.

Объекты и методы исследования. Одной из основных проблем оценки доступности древесных ресурсов является то, что этот показатель нельзя однозначно определить (измерить) в количественном выражении [8, 9]. В таких случаях для того, чтобы оценка была статистически обоснована, применяются методы факторного анализа и экспертных оценок [10].

Для выполнения факторного анализа были выделены различные факторы, оказывающие влияние на доступность древесных ресурсов. Для удобства анализа факторы объединены в укрупненные группы. Для оценки влияния каждой группы факторов была проведена экспертная оценка. Экспертами в данном исследовании выступили инженерно-технические работники лесопромышленных предприятий Красноярского края, а также ученые из российских лесных учебных заведений.

Для того чтобы экспертная оценка могла быть признана значимым статистическим исследованием, ее результаты должны соответствовать определенным требованиям. Сначала рассчитывается весомость каждого фактора. Затем определяется разброс мнений экспертов. Следующим этапом проводится проверка степени согласованности по всем оцениваемым факторам. В процессе проведения анализа исключаются факторы, признанные незначительными. Однако, поскольку экспертная оценка факторов не является предметом данного исследования и ее пошаговое выполнение и промежуточные итоги не представляют интереса в разрезе исследуемого вопроса, в данной работе представлен только конечный результат (на рисунке).

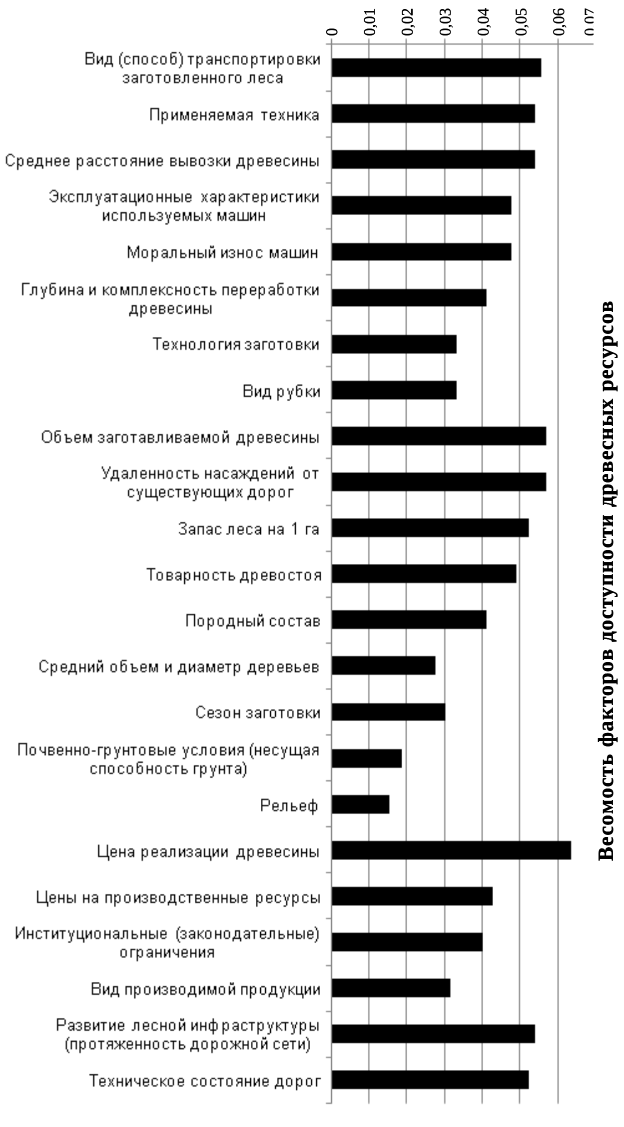


Рис. 1. Итоговые значения экспертной оценки факторов доступности древесных ресурсов

Результаты и их обсуждение. Выбранные факторы сгруппированы по характеру возникновения и влияния на ключевой показатель (в данном исследовании ключевым показателем является доступность древесных ресурсов), однако следует отметить, что факторы внутри одной группы имеют различные значения весомости. Весомость фактора — это показатель, объединяющий сумму ранговых баллов и встречаемость данного балла. При помощи этого показателя можно комплексно оценить значимость того или иного фактора.

Таким образом, получена количественная оценка значимости факторов доступности древесных ресурсов. Далее необходимо проследить, каким образом данные факторы влияют на ключевой показатель. Для этого в исследование вводят критерии — признаки, или показатели, на основе которых производится оценка доступности древесных ресурсов. Исходя из этого, оценка влияния факторов на доступность древесных ресурсов должна производиться посредством определения влияния различных факторов на критерии, по которым, в свою очередь, оценивают экологическую, технологическую, техническую, транспортную и экономическую доступность леса (на рисунке). При этом важным свойством фактора является то, он может быть общим для нескольких критериев, т. е. изменение только одного фактора влечет за собой изменение оценки доступности древесины сразу по нескольким критериям [2, 7, 10].

Оценка экологической доступности древесных ресурсов производится по критерию «категория защитности», который предполагает разделение лесов на землях лесного фонда на защитные, эксплуатационные и резервные; полностью доступными признаются эксплуатационные леса и частично доступными — защитные леса (для проведения рубок ухода, санитарных рубок). Резервные леса относятся к временно недоступным, поскольку по истечении определенного времени они могут быть переведены в категорию эксплуатационных.

Поскольку технологическая доступность предполагает, что применяемая технология (с учетом вида машин и их последовательности) позволяет преобразовать данный вид ресурса (ресурс как совокупность природно-климатических условий участка и качественных характеристик древесины) в заданный вид продукции, для оценки технологической доступности вводится критерий «способность технологии осваивать рассматриваемые древесные ресурсы в требуемую продукцию». Например, согласно данному критерию при использовании технологии по заготовке круглых лесоматериалов будет недоступна продукция в виде щепы (для выработки щепы необходимы иные виды машин и способы транспортировки). При этом технологическая доступность древесных ресурсов относительно конкретного лесозаготовителя может повыситься, например, если лесозаготовительная бригада пройдет обучение, овладеет соответствующей технологией, а в систему машин будут введены новые виды лесной техники).

Для определения критериев технической доступности древесных ресурсов необходимо пояснить, что под технической доступностью понимается возможность освоить древесные ресурсы определенной техникой в определенный момент времени. В процессе подбора технологии освоения лесного участка устанавливается перечень необходимых видов машин и их последовательность в технологическом процессе. Для достижения технической доступности технические характеристики применяемой системы машин должные соответствовать заданным природно-климатическим условиям. Таким образом, критериями технической доступности древесных ресурсов выступают базовые эксплуатационные характеристики лесных машин:

– максимальный рабочий уклон;
– удельное давление на грунт;
– рабочий диапазон температур;
– максимальный диаметр обрабатываемых деревьев.

При определении транспортной доступности древесных ресурсов оптимальным критерием является наличие путей, соответствующих транспортному оснащению. Под данный критерий попадают только те транспортные пути, применение которых возможно при текущем техническом оснащении лесозаготовителя. Например, наличие водных путей сообщения между участком лесозаготовки и пунктом доставки повысит транспортную доступность леса только при технической возможности осуществления лесосплава. То же относится и к сухопутному транспорту.

Экономическая доступность древесных ресурсов традиционно оценивается при помощи рентабельности производимой продукции. Рентабельность является универсальным относительным показателем и эффективным инструментом для различных управленческих целей, в том числе: сравнения, планирования, организации, контроля производственного процесса. Выступая в качестве критерия, рентабельность производимой продукции может иметь определенную величину — норму, которая указывает на экономическую доступность древесных ресурсов.

В таблице 1 представлены результаты анализа влияния отдельных факторов на доступность древесных ресурсов посредством обозначенных критериев.

Примечательно, что нет прямой связи между весомостью фактора и широтой его влияния. Например, фактор «цена реализации древесины», имеющий наибольшее значение весомости, оказывает влияние только на экономическую доступность, в то время как влияние фактора рельефа при наименьшей величине весомости распространяется на экологическую, технологическую, техническую и транспортную доступность. Таким образом, весомость фактора указывает на то, какой величины эффект он может оказывать на тот или иной критерий доступности древесных ресурсов, а широта влияния фактора определяется количеством критериев, зависящих от его изменения.

В условиях ограниченности ресурсов лесозаготовителя объектом разрабатываемых оптимизационных мероприятий должны становиться факторы, имеющие соответствующую широту влияния и наибольшее значение весомости [6]. Также обязательным условием будет управляемость фактора (см. таблицу). Существуют факторы, которые субъект лесопользования может изменить (как правило, это факторы внутренней среды предприятия), и факторы, не поддающиеся контролю (чаще всего это факторы внешней среды).

Учитывая результаты проведенного анализа, можно определить, на какие факторы следует нацеливать оптимизационные мероприятия, чтобы получить максимальный эффект.

1) Применяемая техника. Данный фактор имеет значение весомости 0,0540 и оказывает влияние на четыре из пяти видов доступности древесных ресурсов: экологическую, технологическую, техническую, транспортную и экономическую. Из этого следует, что мероприятия по оптимизации компоновки систем лесных машин можно признать наиболее действенным методом повышения доступности древесных ресурсов.

2) Оъем заготавливаемой древесины. Значение весомости данного фактора 0,0571, его изменение оказывает влияние на технологическую и экономическую доступность древесных ресурсов. Таким образом, грамотное регулирование объема заготавливаемой древесины (как максимального, так и минимального) — это второй по эффективности метод оптимизации лесозаготовки, позволяющий повысить доступность древесных ресурсов.

3) Вид (способ) транспортировки заготовленного леса. Значение весомости фактора — 0,0556, изменение данного фактора оказывает влияние на транспортную и экономическую доступность древесных ресурсов. Мероприятия по оптимизации маршрутов доставки сырья, подбор оптимальной системы машин могут значительно повысить эффективность процесса транспортировки сырья, сократив затраты ресурсов и времени.

4) Цена реализации древесины. Значение весомости фактора — 0,0635, область влияния — экономическая доступность древесины. Данный фактор является управляемым, однако он жестко ограничен рыночными условиями и конкуренцией. Превышение цены реализации над среднерыночным уровнем влечет снижение спроса и отток потребителей. Поэтому для управления данным фактором используют мероприятия, направленные не на повышение цен, а на корректировку механизма ценообразования. Такие мероприятия могут повысить рентабельность производимой продукции, но на остальные критерии доступности древесных ресурсов они не влияют.

Таблица 1

Влияние факторов на доступность древесных ресурсов

Группа факторов/фактор	Широта влияния фактора на различные виды					Весомость фактора	Управляемость фактора (да/нет)
	ог ич ес	ол ог ич	хн ич ес	ан сп ор	ом ич ес		
1	2	3	4	5	6	7	8
I. Технико-технологические факторы							
Вид (способ) транспортировки заготовленного леса	–	–	–	+	+	0,0556	да
Применяемая техника	+	+	+	+	–	0,0540	да
Среднее расстояние вывозки древесины	–	–	–	+	+	0,0540	нет
Эксплуатационные характеристики используемых машин	+	–	+	+	–	0,0476	да
Моральный износ машин	–	–	+	–	–	0,0476	да
Глубина и комплексность переработки древесины	–	+	+	–	+	0,0413	да
Технология заготовки	+	+	–	–	–	0,0333	да
Вид рубки	+	+	+	–	–	0,0333	да
II. Сырьевые факторы							
Объем заготавливаемой древесины	–	+	–	–	+	0,0571	да
Удаленность насаждений от существующих дорог	–	+	–	+	–	0,0571	нет
Запас леса на 1 га	–	–	–	–	+	0,0524	нет
Товарность древостоя	–	–	–	–	+	0,0492	нет
Породный состав	–	–	–	–	+	0,0413	нет
Средний объем и диаметр деревьев	–	–	+	–	–	0,0275	нет
III. Природно-климатические факторы							
Сезон заготовки	–	–	+	+	–	0,0302	нет
Почвенно-грунтовые условия (несущая способность грунта)	–	+	+	+	–	0,0187	нет
Рельеф	+	+	+	+	–	0,0154	нет
IV. Экономические и законодательные факторы							
Цена реализации древесины	–	–	–	–	+	0,0635	да
Цены на производственные ресурсы	–	–	–	–	+	0,0429	нет
Институциональные ограничения	+	+	+	–	–	0,0401	нет
Вид производимой продукции	–	+	–	–	+	0,0315	да
V. Факторы развития инфраструктуры							
Развитие лесной инфраструктуры (протяженность дорожной сети)	–	–	+	+	–	0,0540	нет
Техническое состояние дорог	–	–	+	+	–	0,0524	нет
Всего						1,0000	–

Заключение

Перечисленные факторы являются приоритетными в вопросе доступности древесных ресурсов, поскольку их изменение в нужном направлении производит максимальный положительный эффект. Полученные результаты могут быть использованы как инструмент принятия управленческих решений, нацеленных на повышение доступности древесных ресурсов для лесозаготовительных предприятий.

Литература

1. Болотов О.В. Методологические основы планирования экономически эффективного освоения лесов // Лесной вестник. Forestry bulletin. 2013. Вып. 1 (93). С. 12-15.
2. Григорьев И.В., Куницкая О.А. Современные концепции лесопользования // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: материалы науч.-практической конф. М., 2015 Т. 3, № 2-2 (13-2). С. 212-215.
3. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Григорьева О.И., Рудов М.Е. Поиск новых технических решений для повышения экологической совместимости лесных машин с лесной средой // Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности: материалы науч.-практической конф. Петрозаводск, 2015. С. 9-11.
4. Каракчиева И.В., Чумаченко С.И. Система оценки экономической доходности древесных ресурсов леса и экономической доступности лесных участков // Фундаментальные исследования. 2016. Вып. 7-2. С. 372-377.
5. Майоров И.Г., Третьяков А.Г. Экономическая доступность лесных ресурсов и транспортная доступность // Экономические науки. 2014. Вып. 119. С. 24-28.
6. Третьяков А.Г. Экономическая доступность лесных ресурсов: факторы, ее определяющие, и достоверность оценки // Лесотехнический журнал. 2015. Вып. 1 (17). С. 274-287.
7. Мохирев А.П., Болотов О.В. Проектирование сети лесных дорог на примере предприятий Красноярского края: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2010. 178 с.
8. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Куницкая О.А. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестн. КрасГАУ. 2012. № 6. С. 72 77.
9. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2014. № 5. С. 1499-1502.
10. Якушева Т.В. Критерии оценки доступности лесных ресурсов на примере северо-западного федерального округа // Леса россии в XXI веке: материалы науч.-практической конф., г. Санкт-Петербург, 8-10 окт. 2014 г. СПб.: СПбГЛУ, 2014. С. 78-81.

References

1. Bolotov O.V. Problems of designing of forest cutting and clearance in the reservoir floors HPS of Siberia // Forestry bulletin. 2013. Vyp. 1 (93). P. 12-15.
2. Grigor’ev I.V., Kunitskaya O.A. Modern concepts of forest management // Aktual’nye napravleniya nauchnykh issledovanii XXI veka: teoriya i praktika: materialy nauch.-prakticheskoi konf. M., 2015 T. 3, № 2-2 (13-2). P. 212-215.
3. Grigor’ev I.V., Tikhonov I.I., Grigor’eva O.I., Rudov M.E. Search for new technical solutions for improving the ecological compatibility of forest machines with forest environments // Intensifikatsiya formirovaniya i okhrany intellektual’noi sobstvennosti: materialy nauch.-prakticheskoi konf. Petrozavodsk, 2015. P. 9-11.
4. Karakchieva I.V., Chumachenko S.I. System of the assessment of economic profitability of wood resources of the wood and economic availability of the timberland // Fundamental research. 2016. Vyp. 7-2. P. 372-377.
5. Maiorov I.G., Tret’yakov A.G. Economic accessibility of forest resources and accessibility // Economic sciences. 2014. Vyp. 119. P. 24-28.
6. Tret’yakov A.G. Economic accessibility of forest resources: its determining factors and the accuracy of the estimates // Forestry Engineering Journal. 2015. Vyp. 1 (17). P. 274-287.
7. Mokhirev A.P., Bolotov O.V. Designing a network of forest roads on the example of enterprises of the Krasnoyarsk Territory: monogr. Krasnoyarsk: SibGTU, 2010. 178 p.
8. Grigor’ev I.V., Grigor’eva O.I., Nikiforova A.I., Kunitskaya O.A. Substantiation of the technique for the forest management ecological efficiency estimation // The Bulletin of KrasGAU. 2012. № 6. P. 72-77.
9. Grigor’ev I.V., Khitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigor’eva O.I., Kunitskaya O.A. Determination of energy intensity of forest products within methodology for assessing eco-efficiency of forest management // Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. 2014. № 5. P. 1499-1502.
10. Yakusheva T.V. Criteria for assessing the availability of forest resources on the example of the North-West Federal District // Lesa rossii v XXI veke: materialy nauch.-prakticheskoi konf., g. Sankt-Peterburg, 8-10 okt. 2014 g. SPb.: SPbGLU, 2014. P. 78-81.

УДК 630.3 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-116-120

Метод расчета вероятности усталостного разрушения покрытия лесовозной автомобильной дороги с позиций механики разрушения

А.В. Степанов[a], А.Н. Петров[b], А.В. Питухин[c]

Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина 33, Петрозаводск, Республика Карелия
[a]stepanov@petrsu.ru, [b]sssn20088@yandex.ru, [c]pitukhin@petrsu.ru
[a]https://orcid.org/0000-0003-4495-6883, [b]https://orcid.org/0000-0002-5349-3916,
[c]https://orcid.org/0000-0002-2107-1129
Статья поступила 9.01.2018, принята 2.02.2018

Повышение качества дорожных покрытий лесовозных автомобильных дорог и снижение затрат на их содержание являются актуальной проблемой. Интенсивное движение лесовозных автопоездов существенно уменьшает срок службы покрытий. Одной из причин достижения предельного состояния дорожной одежды является усталостное разрушение. Это характерно прежде всего для цементобетонных и асфальтобетонных покрытий. Процесс усталостного разрушения материалов успешно описан методами линейной механики разрушения. Уравнение Пэриса, определяющее скорость роста усталостной трещины, является одним из самых распространенных. На основе уравнения Пэриса предложен метод оценки вероятности усталостного разрушения дорожного покрытия. Суммирование усталостных повреждений осуществлялось с использованием линейной и линейной корректированной гипотез. Для вероятностного описания процесса роста усталостной трещины использовался метод статистической линеаризации. Закон распределения срока службы предполагался логарифмически нормальным. Для апробации метода приведен пример расчета вероятности усталостного разрушения асфальтобетонного дорожного покрытия при интенсивном воздействии тяжелонагруженных лесовозных автопоездов. Показана адекватность предложенных моделей. Установлено, что вариации нагрузок и свойств дорожного покрытия существенно влияют на вероятность усталостного разрушения. Намечены дальнейшие пути совершенствования предложенного метода.

Ключевые слова: дорожное покрытие; усталостное разрушение; срок службы; вероятность разрушения.

Method for calculating the probability of surface fatigue failure of forest roads from the standpoint of fracture mechanics

A.V. Stepanov[a], A.N. Petrov[b], A.V. Pitukhin[c]

Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia
[a]stepanov@petrsu.ru, [b]sssn20088@yandex.ru, [c]pitukhin@petrsu.ru
[a]https://orcid.org/0000-0003-4495-6883 [b]https://orcid.org/0000-0002-5349-3916,
[c]https://orcid.org/0000-0002-2107-1129
Received 9.01.2018, accepted 2.02.2018

Improving the quality of road surfaces of logging roads and reducing the cost of their maintenance is an actual problem. The intensive traffic of timber trucks significantly reduces the service life of road surfaces. One of the reasons for reaching the limit state of a surface is fatigue destruction. This is typical for cement-concrete and asphalt-concrete coatings. The process of fatigue destruction of materials has been successfully described by the methods of linear fracture mechanics. The Paris equation, which determines the rate of growth of the fatigue crack, is one of the most common. Based on the Paris equation, a method for estimating the probability of fatigue failure of a road surface is proposed. The summation of fatigue damage was carried out using linear and linear corrected hypotheses. For a probabilistic description of the growth process of a fatigue crack, the method of statistical linearization was used. The law of the distribution of the service life was assumed to be logarithmically normal. The example of the calculation of failure probability of asphalt coating fatigue is given in order to test the method. The adequacy of the proposed models is shown. It is established that the variation of the loading and road surface properties significantly affects the probability of fatigue failure. The further ways of improving the proposed method are offered.

Keywords: road surface; fatigue failure; service life; failure probability.

Введение

В современных условиях поставка сортиментов с верхнего склада на предприятие потребителя, как правило, осуществляется тяжелонагруженными лесовозными автомобилями и автопоездами. В ряде случаев это осуществляется по лесовозным автомобильным дорогам с жестким железобетонным покрытием, построенным ранее в ряде районов Ленинградской и Вологодской областей, Республики Карелия. Зачастую вывозка древесины производится и по дорогам общего пользования с асфальтобетонным покрытием. Для вышеуказанных покрытий одним из основных видов разрушения является усталостное разрушение, возникающее под действием циклических нагрузок.

Расчет на усталостное разрушение важен при проектировании объектов машиностроения, строительных конструкций, автомобильных дорог. Существуют три группы методов оценки усталостной долговечности: методы строительной механики, термодинамический подход, методы механики разрушения.

Методы строительной механики достаточно хорошо развиты и широко применяются. Например, они являются основой отраслевых дорожных норм по проектированию нежестких дорожных одежд ОДН 218.046-01. Термодинамический подход появился относительно недавно и пока не нашел существенного применения, исследования же в данном направлении успешно продолжаются. Так, в работе М.А. Завьялова и А.М. Кириллова [1] произведен анализ зависимостей термодинамических функций дорожного покрытия от времени эксплуатации, получен ряд расчетных формул для определения межремонтного срока службы покрытия. Новые критерии, включая энергетические, предложены для оценки усталостной долговечности в статьях M. Livneh и C. Maggiore с соавторами [2, 3]. Методы механики разрушения возникли в середине прошлого века и в настоящее время интенсивно развиваются и применяются во многих сферах инженерной деятельности [4–10]. В отличие от двух предыдущих групп методов, базирующихся на феноменологических моделях, методы механики разрушения основаны на структурных моделях, описывающих зарождение и рост трещин. Это позволяет включать в модели многие трудноучитываемые факторы и повышает точность оценки рассчитываемых величин. Вследствие вышесказанного будем опираться при расчете усталости дорожного покрытия на методы механики разрушения.

Следует отметить, что в большинстве публикаций переменные полагаются детерминистическими, т. е. неслучайными. В ряде публикаций используется вероятностный подход в методах механики разрушения [6, 7, 10–14]. Вероятностно-статистические методы в механике разрушения разрабатываются в трех основных направлениях [15]. Простейший подход представляет собой экстраполяцию данных по отказам и не учитывает механические и физические особенности изучаемой системы. Такой статистический анализ называется «data-base» подход (подход «баз данных») и представлен, например, в трудах [16–19].

Второй подход к развитию вероятностных методов механики разрушения нашел свое применение в работах [10, 11, 13, 20]. В этом случае переменные в моделях полагаются случайными, статистические вариации каждого параметра модели определяются количественно и объединяются для вычисления безопасности и рисков.

Третий подход, известный как комбинированный анализ, использует как первый, так и второй подходы [12]. Широко используется метод Монте-Карло, опирающийся на второй подход. Однако метод статистической линеаризации, предложенный Серенсеном с соавторами [21] и широко используемый в машиностроении, не применяется в расчетах дорожных покрытий. Таким образом, в настоящей работе предложен метод оценки вероятности усталостного разрушения дорожного покрытия с использованием методов механики разрушения и статистической линеаризации.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- Выбрать уравнение механики разрушения, моделирующее развитие усталостной трещины.
- Получить формулу для расчета числа циклов распространения усталостной трещины от размера первоначального трещиноподобного дефекта до критической величины (срок службы).
- На основе метода статистической линеаризации определить среднее значение и дисперсию срока службы.
- Подобрать закон распределения срока службы.

Также целесообразно дать пример расчета и провести его первичный анализ, наметить дальнейшие пути развития предложенного в статье метода.

Методы. Известно, что рост усталостных трещин может быть описан с точки зрения линейной механики разрушения с использованием коэффициента интенсивности напряжений K [4]. Скорость роста трещины за цикл, dl/dN, может быть выражена в виде уравнения Пэриса [5]:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n, \qquad (1)$$

где C и n — эмпирические параметры; ΔK — размах коэффициента интенсивности напряжений:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}.$$

Здесь K_{max} и K_{min} соответственно максимальное и минимальное значения коэффициента интенсивности напряжений в цикле нагружения, полученные при максимальном и минимальном напряжении в цикле.

Эквивалентные выражения могут быть получены путем использования коэффициента асимметрии цикла R [4, 6, 7]:

$$\Delta K = Y(l)\sigma_{1max}(1-R)\sqrt{\pi l}, \qquad (2)$$

где $Y(l)$ — коэффициент, учитывающий форму объекта и длину (полудлину) трещины l; σ_{1max} — максимальное первое главное напряжение в цикле нагружения.

Как описано Маартеном с соавторами [8], с использованием конечно-элементного анализа получено соотношение между раскрытием трещины, длиной трещины и коэффициентом интенсивности напряжений, определены параметры C и n в уравнении Пэриса исследуемой асфальтной смеси.

Предположим, что нагрузка на дорожное покрытие описывается в виде блока $\{\sigma_{1i}, w_i\}$, где w_i — число циклов в i-й ступени блока; σ_{1i} — максимальное первое главное напряжение на нижней плоскости асфальтобетонного покрытия в i-й ступени блока нагружения. Размер блока:

$$w_b = \sum_{i=1}^{m} w_i,$$

где m — количество ступеней блока нагружения.

Предполагая справедливость линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, получим выражение для оценки числа циклов распространения усталостной трещины от размера начального трещиноподобного дефекта l_0 до конечного (критического) размера трещины l_c путем интегрирования выражения

(1) и принимая во внимание выражение (2) при условии $R = 0$.

$$N_p = \frac{w_b}{C\pi^{n/2}\sum_{i=1}^{m} w_i\sigma_{1i}^n}\int_{l_0}^{l_c}\frac{dl}{Y^n(l)l^{n/2}}. \qquad (3)$$

При предположении малости l_0 по сравнению с толщиной покрытия t и $t = l_c$ можно считать $Y(l) = Y = const$. После интегрирования уравнение (3) примет вид:

$$N_p = \frac{2w_b\left(l_c^{\frac{2-n}{2}} - l_0^{\frac{2-n}{2}}\right)}{C(2-n)Y^n\pi^{n/2}\sum_{i=1}^{m} w_i\sigma_{1i}^n}. \qquad (4)$$

В случае нерегулярной нагруженности, в соответствии с рекомендацией Серенсена с соавторами [21], случайные вариации функции распределения напряжений могут быть описаны соотношением:

$$\sigma_{1i} = \bar{\sigma}_{1i}\mathcal{E},$$

где $\bar{\sigma}_{1i}$ — средний уровень напряжений i ступени блока нагружения; $\mathcal{E}$ — коэффициент, учитывающий влияние нерегламентируемых факторов (температура, погодные условия и т. д.). $\mathcal{E}$ полагается нормально распределенной случайной величиной со средним значением $\bar{\mathcal{E}} = 1$ и коэффициентом вариации $v_{\mathcal{E}} = 0.1$ [21].

Обозначив:

$$A = \frac{2\left(l_c^{\frac{2-n}{2}} - l_0^{\frac{2-n}{2}}\right)}{(2-n)Y^n\pi^{n/2}},$$

получим уравнение:

$$N_p = \frac{A}{C\mathcal{E}^n\sum_{i=1}^{m} w_i\bar{\sigma}_{1i}^n}. \qquad (5)$$

Полагаем, что, помимо нагруженности покрытия, свойства материалов покрытия тоже являются случайными. Таким образом, константа C уравнения Пэриса является случайной со средним значением $\bar{C}$ и дисперсией S_C^2. Тогда среднее число циклов распространения усталостной трещины до разрушения дорожного покрытия в соответствии с методом статистической линеаризации [21] определяется зависимостью:

$$\bar{N}_p = \frac{A}{\bar{C}\sum_{i=1}^{m} w_i\bar{\sigma}_{1i}^n}. \qquad (6)$$

Определим дисперсию логарифма срока службы S_{lgNp}^2. Для этого прологарифмируем выражение (5):

$$lgN_p = lgA - lgC - nlg\mathcal{E} - lg\sum_{i=1}^{m} w_i\bar{\sigma}_{1i}^n.$$

Обозначив:

$$A_1 = lgA - lg\sum_{i=1}^{m} w_i\bar{\sigma}_{1i}^n,$$

запишем:

$$lgN_p = A_1 - lgC - nlg\mathcal{E}. \qquad (7)$$

В правой части уравнения (7) C и $\mathcal{E}$ являются случайными величинами. Дисперсия логарифма срока службы определяется с использованием метода статистической линеаризации [21].

$$S_{lgN_p}^2 = \left(\frac{\partial lgN_p}{\partial C}\right)^2_{|\,C=\bar{C}} S_C^2 + \left(\frac{\partial lgN_p}{\partial \mathcal{E}}\right)^2_{|\,\mathcal{E}=\bar{\mathcal{E}}} S_{\mathcal{E}}^2, \qquad (8)$$

где:

$$\left(\frac{\partial lgN_P}{\partial C}\right)^2_{|\,C=\bar{C}} S_C^2 = \left(0.434\frac{1}{\bar{C}}\right)^2 S_C^2 = \left(0.434\frac{S_C}{\bar{C}}\right)^2 = 0.188v_C^2,$$

$$\left(\frac{\partial lgN_P}{\partial \mathcal{E}}\right)^2_{|\,\mathcal{E}=\bar{\mathcal{E}}} S_{\mathcal{E}}^2 = 0.188n^2v_{\mathcal{E}}^2.$$

Или:

$$S_{lgN_p}^2 = 0.188(v_C^2 + n^2v_{\mathcal{E}}^2). \qquad (9)$$

Здесь S_{lgNp}^2 — дисперсия логарифма срока службы дорожного покрытия при усталостном разрушении; v_C — коэффициент вариации параметра C в уравнении Пэриса; $v_{\mathcal{E}}$ — коэффициент вариации переменной $\mathcal{E}$, учитывающей влияние нерегламентируемых факторов на нагруженность покрытия.

Предполагаем, что закон распределения срока службы является логарифмически нормальным. Логнормальное распределение широко используется в общей теории надежности для описания распределения числа циклов до отказа при усталостном разрушении материалов и переменных нагрузках в вероятностном проектировании [21; 22]. В этом случае логарифм наработки до отказа (срока службы покрытия) с вероятностью Q при усталостном разрушении может быть определен:

$$lgN_Q = lg\bar{N}_p + U_Q S_{lgN_p}, \qquad (10)$$

где U_Q — квантиль закона нормального распределения для вероятности Q.

Величина трещиноподобного дефекта l_0 может задаваться из различных соображений, например, глубина шва в укрепляющем покрытии, наибольший размер фракции наполнителя и т. д.

Следует отметить, что линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений не всегда подтверждается экспериментально. Поэтому Серенсеном с соавторами [21] для таких случаев предлагается корректированная линейная гипотеза. В этом случае сумма накопленных усталостных повреждений до разрушения отличается от единицы и подсчитывается по приведенной ниже зависимости:

$$a_p = \frac{\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{-1}}\xi - K}{\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{-1}} - K}, \qquad при\ a_p \geq 0{,}2. \qquad (11)$$

Здесь σ_{max} — максимальная амплитуда в блоке нагружения; σ_{-1} — предел выносливости материала покрытия; K — коэффициент, позволяющий получить лучшее соответствие опытных и расчетных данных, $K = 0{,}5…0{,}7$.

Коэффициент ξ определяется по формуле:

$$\xi = \sum_{i=1}^{m}\frac{\sigma_i}{\sigma_{max}}\cdot\frac{w_i}{w_b}.$$

Если по формуле (11) получается $a_P < 0{,}2$, то в расчетах следует принимать $a_P = 0{,}2$.

Таким образом, при использовании корректированной линейной гипотезы накопления усталостных повреждений формула (6) приводится к виду:

$$\bar{N}_p = \frac{a_p A}{\bar{c}\sum_{i=1}^{m} w_i \bar{\sigma}_{1i}^{n}}. \qquad (12)$$

Результаты и обсуждение. Для проверки предложенного метода необходимо сравнить результаты расчета с экспериментальными данными. Экспериментальные данные для скорости роста трещины получены А.Б. Каплун с соавторами [23] для мелкозернистого асфальтобетона с модулем упругости E = 1 500 Мпа. В упомянутой публикации скорость роста усталостной трещины определялась в *см/цикл*, коэффициент интенсивности напряжений — в $кг/см^{2/3}$. После обработки экспериментальных данных, представленных в работе [23], в диссертации А.Н. Петрова [22] значения констант уравнения Пэриса составили n = 4.11 и C = 7.52*10^{-7}. Аналогичным образом по известной публикации [22] получены результаты n = 4.07 и C = 2.62*10^{-7}. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и расчетных данных

$K_{I\,max}$, $кг/см^{3/2}$	Скорость роста трещины dl/dN*10^{-6}, *см/цикл*		Относительная ошибка, %
	Эксперимент	Расчет	
33.9	1.52	1.49	2
42.6	3.96	3.81	4
50.2	7.12	7.48	5
58.0	12.75	13.54	6
66.4	23.3	23.62	1
75.3	40.98	39.64	3
85.5	68.68	66.89	3

Анализируя результаты (табл. 1), можно сделать вывод о возможности использования уравнения (1) для прогнозирования усталостного разрушения асфальтобетонного покрытия.

Для проверки предложенного метода в качестве примера был произведен расчет вероятности отказа асфальтобетонного покрытия из-за усталостного разрушения. Задавались размер трещиноподобного дефекта $l_0 = 20$ *мм*, критический размер трещины $l_c = 100$ *мм*, константы уравнения Пэриса n = 4.11 и C = 7.52*10^{-13}, коэффициенты вариации $\nu_\varepsilon = 0.3$ и $\nu_C = 0.3$.

Блок нагруженности определялся расчетом первых главных напряжений на глубине 100 мм от воздействия на покрытие при нагрузке от лесовозного автопоезда Sisu C500 и представлен в табл. 2.

Таблица 2

Блок нагруженности

$\sigma_{1i}, кг/см^2$	6	7	8
w_i	4	1	2

Результаты расчета представлены на рисунке 1.

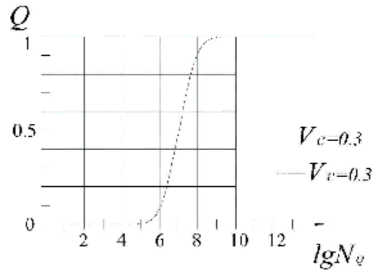


Рис. 1. Вероятность усталостного разрушения асфальтобетонного покрытия

Результаты расчета показывают, что с вероятностью 10 % усталостное разрушение покрытия произойдет через 1.15*10^{6} циклов. Средний срок службы — 1.03*10^{7} циклов. Был также произведен расчет для различных коэффициентов вариации ν_ε и ν_C.

Например, при $\nu_\varepsilon = \nu_C = 0.1$ 10%-ный срок службы составляет 2.9*10^{6} циклов, что почти в три раза отличается от предыдущего результата.

Выводы

1. Представлен метод оценки вероятности усталостного разрушения дорожного покрытия. Метод основан на использовании уравнения Пэриса, описывающего скорость роста усталостной трещины. Использовались как линейная, так и корректированная линейная гипотезы суммирования усталостных повреждений. Для вероятностного описания процесса усталости используется метод статистической линеаризации. Распределение срока службы полагалось логнормальным.
2. В статье приведен пример расчета асфальтобетонного покрытия лесовозной автомобильной дороги. Показано, что вариации нагрузок и свойств дорожного покрытия существенно влияют на вероятность усталостного разрушения.
3. Дальнейшее развитие предполагаемого метода может идти с учетом размеров пластической зоны в вершине трещины [26] и использования метода Монте-Карло.
4. Кроме того, желательно учитывать жесткость и состав основания дорожного покрытия.

Литература

1. Broek D. Elementary engineering fracture mechanics, Noordhoff, Leyden. 1974.
2. Paris P.S., Erdogan F.A. A critical analysis of crack propagation laus // J. Basic Engng. 1963. ASME 85D. P. 528-534.
3. Pitukhin A.V. 1992. Fracture Mechanics and Optimal Design. Int // J. for Numerical Methods in Engineering. 1992. Vol. 34. P. 933-940.
4 Pitukhin A.V. 1997. Optimal Design Problems Using Fracture Mechanics Methods, Computers and Structures. 1997. Vol. 65. № 4. P. 621-624.
5. Maarten M. Jacobs J., Arian H. Radjan Khedoe. 2012. Determination of Crack Growth Parameters of Asphalt Mixtures // 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: mechanisms, modeling, testing, detection, prevention, and case histories. Springer. RILEM Bookseries. 2012. Vol. 4. P. 941-952.
6. Livneh M. 2012. On the Fatigue Criterion for Calculating the Thickness of Asphalt Layers // 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: mechanisms, modeling, testing, detection, prevention, and case histories. Springer. RILEM Bookseries. 2012. Vol. 4. P. 761-770.

7. Maggiore C., Grenfell J., Airey ., Colop A.C. 2012. Evaluation of Fatigue Life Using Dissipated Energy Methods // 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: mechanisms, modeling, testing, detection, prevention, and case histories. Springer. RILEM Bookseries. 2012. Vol. 4. P. 643-652.

8. Johnston G.O. A review of probabilistic fracture mechanics literature. Reliability Engineering. 1982. № 3. P. 423-448.

9. Rau C.A., Besuner P.M. Statistical aspects of design: risk assessment and structural safety, Philos. Trans. R. Soc., London, 1981. Ser. A 299. P. 111-130.

10. Bolotin V.V. Stochastic models of cumulative damage in composite materials, in: Progress in Fatigue and Fracture,1976. P. 103-111.

11. Morgado T.I.M. Fatigue Life Extension Study in Cast Steel Railway Couplings Used in Freight Trains// International Journal of Mechanical Engineer and Applications. Special Issue: Structural Integrity of Mechanical Components. 2015. Vol. 3, № 2-1. P. 1-6.

12. Lepikhin A., Moskvichev V., Doronin S. 1998. Statistical fracture modeling of weld joint for nuclear reactor components // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1998. № 29. C. 103 -107.

13. Freudenthal A.M., Shinozuka. M. Structural safety under conditions of ultimate load failure and fatigue, WaDDTR. 1961. P. 61-77.

14. Freudenthal A.M. New aspects of fatigue and fracture mechanics, Eng. Fract. 1974. Mech. № 6. P.775-793.

15. Kaz H.-W., Lee Y.-H., Wu P.-H. 2008. Development of Fatigue Cracking Prediction Models Using Long-Term Pavement Performance Database // Journal of Transportation Engineering. 2008. № 134 (11). P. 477-482.

16. Ferreira A., Rui Micaelo, Souza R. 2012. Cracking Models for Use in Pavement Maintenance Management // 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: mechanisms, modeling, testing, detection, prevention, and case histories. Springer. RILEM Bookseries. 2012. Vol. 4. P. 429-439.

17. Питухин А.В., Петров А.Н., Марков В.И., Степанов А.В. Метод определения вероятности безотказной работы участка лесовозной автомобильной дороги вследствие усталостного изнашивания дорожного покрытия // Транспортное дело России. 2013. № 2 (105). С.15-18.

18. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шендерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.

19. Modarres M., Kaminskiy M.P., Krivtsov V. Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide. CRC Press, 2016. 522 p.

20. Тригони В.Е., Лещицкая Т.П., Юрченко А.Н. Повышение долговечности асфальтобетонных слоев усиления при реконструкции аэродромов. М.: МАДИ (ТУ), 1998. 44 с.

21. Al-Qadi I.L. Hao Wang. 2009. Evaluation of pavement damage due to new tire design/ Research Report ICT. 2009. Vol. 9. № 48. 74 p.

22. Петров А.Н. Методы оценки эксплуатационной надежности дорожных покрытий лесовозных дорог: дис. … канд. техн. наук. Петрозаводск, 2012. 207 с.

23. Irwin G.R. Plastic zone near a crack and fracture toughness // 7th Sagamore Advanced Materials Research Conference. Syracuse University Press, 1960. P. IV-63-IV 78.

References

1. Broek D. Elementary engineering fracture mechanics, Noordhoff, Leyden. 1974.

2. Paris P.S., Erdogan F.A. A critical analysis of crack propagation laus // J. Basic Engng. 1963. ASME 85D. P. 528-534.

3. Pitukhin A.V. Fracture Mechanics and Optimal Design // J. for Numerical Methods in Engineering. 1992. Vol. 34. P. 933-940.

4 Pitukhin A.V. Optimal Design Problems Using Fracture Mechanics Methods, Computers and Structures. 1997. Vol. 65. № 4. P. 621-624.

5. Maarten M. Jacobs J., Arian H. Radjan Khedoe. Determination of Crack Growth Parameters of Asphalt Mixtures // 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: mechanisms, modeling, testing, detection, prevention, and case histories. Springer. RILEM Bookseries. 2012. Vol. 4. P. 941-952.

6. Livneh M. On the Fatigue Criterion for Calculating the Thickness of Asphalt Layers // 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: mechanisms, modeling, testing, detection, prevention, and case histories. Springer. RILEM Bookseries. 2012. Vol. 4. P. 761-770.

7. Maggiore C., Grenfell J., Airey, Colop A.C. 2012. Evaluation of Fatigue Life Using Dissipated Energy Methods // 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: mechanisms, modeling, testing, detection, prevention, and case histories. Springer. RILEM Bookseries. 2012. Vol. 4. P. 643-652.

8. Johnston G.O. A review of probabilistic fracture mechanics literature. Reliability Engineering. 1982. № 3. P. 423-448.

9. Rau C.A., Besuner P.M. Statistical aspects of design: risk assessment and structural safety, Philos. Trans. R. Soc., London, 1981. Ser. A 299. P. 111-130.

10. Bolotin V.V. Stochastic models of cumulative damage in composite materials, in: Progress in Fatigue and Fracture, 1976. P. 103-111.

11. Morgado T.I.M. Fatigue Life Extension Study in Cast Steel Railway Couplings Used in Freight Trains // International Journal of Mechanical Engineer and Applications. Special Issue: Structural Integrity of Mechanical Components. 2015. Vol. 3, № 2-1. P. 1-6.

12. Lepikhin A., Moskvichev V., Doronin S. 1998. Statistical fracture modeling of weld joint for nuclear reactor components // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1998. № 29. P. 103-107.

13. Freudenthal A.M., Shinozuka. M. Structural safety under conditions of ultimate load failure and fatigue, WaDDTR. 1961. P. 61-77.

14. Freudenthal A.M. New aspects of fatigue and fracture mechanics, Eng. Fract. 1974. Mech. № 6. P. 775-793.

15. Kaz H.-W., Lee Y.-H., Wu P.-H. 2008. Development of Fatigue Cracking Prediction Models Using Long-Term Pavement Performance Database // Journal of Transportation Engineering. 2008. № 134 (11). P. 477-482.

16. Ferreira A., Rui Micaelo, Souza R. 2012. Cracking Models for Use in Pavement Maintenance Management // 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: mechanisms, modeling, testing, detection, prevention, and case histories. Springer. RILEM Bookseries. 2012. Vol. 4. P. 429-439.

17. Pitukhin A.V., Petrov A.N., Markov V.I., Stepanov A.V. A method of determining the probability of the plot of the lesovozny highway due to the fatigue wear of pavement // Transport business of Russia. 2013. № 2 (105). P. 15-18.

18. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shenderovich R.M. Bearing capacity and calculations of machine parts for strength. M.: Mashinostroenie, 1975. 488 p.

19. Modarres M., Kaminskiy M.P., Krivtsov V. Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide. CRC Press, 2016. 522 p.

20. Trigoni V.E., Leshchitskaya T.P., Yurchenko A.N. Improving the durability of asphalt layers of amplification in the reconstruction of airfields. M.: MADI (TU), 1998. 44 p.

21. Al-Qadi I.L. Hao Wang. 2009. Evaluation of pavement damage due to new tire design/ Research Report ICT. 2009. Vol. 9. № 48. 74 p.

22. Petrov A.N. Methods of assessment of operational reliability of road surfaces logging roads: dis. … kand. tekhn. nauk. Petrozavodsk, 2012. 207 p.

23. Irwin G.R. Plastic zone near a crack and fracture toughness // 7th Sagamore Advanced Materials Research Conference. Syracuse University Press, 1960. P. IV-63-IV78.

УДК 674.81 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-121-125

Влияние температуры и времени на эксплуатационные свойства древесных пластиков без добавления связующих

В.Г. Бурындин[a], А.В. Артемов[b], А.В. Савиновских[c], А.Е. Шкуро[d], П.С. Кривоногов[e]

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт 37, Екатеринбург, Россия
[a]vgb@usfeu.ru, [b]tom-art@yandex.ru, [c]savinovskihand@gmail.com, [d]zj@weburg.ru, [e]aich.kps82@gmail.com
[a]https://orcid.org/0000-0001-6900-3435, [b]https://orcid.org/0000-0001-6994-0154,
[c]https://orcid.org/0000-0001-7303-4912, [d]https://orcid.org/0000-0002-0469-2601,
[e]https://orcid.org/0000-0001-5171-4482
Статья поступила 26.01.2018, принята 5.02.2018

Проанализированы данные теплового старения древесных пластиков без добавления связующих веществ на биоактивированном пресс-сырье. Установлено, что при тепловой обработке древесного пластика без связующего на биоактивированном пресс-сырье при температуре 50 °С за первые 150 ч выдержки протекают процессы, приводящие к повышению прочности при изгибе и твердости у образцов. Высказано предположение о сущности протекающих процессов при коротком и длительном времени выдержки образцов при повышенных температурах. На первом этапе наблюдается сшивка за счет метилольных и гидроксильных групп лигнина и целлюлозы, что приводит к увеличению значений твердости и ударной вязкости, а разбухание и водопоглощение уменьшаются. На втором этапе происходят процессы старения и медленного снижения прочностных показателей, сопровождаемые небольшим ростом водопоглощения и разбухания образцов. Старение образцов протекает за счет деструкции химических связей лигнина, целлюлозы и ее компонентов, играющих роль связки в образцах древесного пластика без связующего. По результатам теплового старения образцов выявлено, что предполагаемый срок эксплуатации изделий из древесного пластика без связующего на биоактивированном пресс-сырье в комнатных условиях составляет 7,5 года.

Ключевые слова: древесные пластики; биоактивация пресс-сырья; тепловое старение; долговечность; влияние температуры.

The influence of temperature and time on the performance properties of wood plastics without using resins

V.G. Buryndin[a], A.V. Artyomov[b], A.V. Savinovskih[c], A.E. Shkuro[d], P.S. Krivonogov[e]

Ural State Forest Engineering University; 37, Sibirsky Trakt St., Ekaterinburg, Russia
[a]vgb@usfeu.ru, [b]tom-art@yandex.ru, [c]savinovskihand@gmail.com, [d]zj@weburg.ru, [e]aich.kps82@gmail.com
[a]https://orcid.org/0000-0001-6900-3435, [b]https://orcid.org/0000-0001-6994-0154,
[c]https://orcid.org/0000-0001-7303-4912, [d]https://orcid.org/0000-0002-0469-2601,
[e]https://orcid.org/0000-0001-5171-4482
Received 26.01.2018, accepted 5.02.2018

The data of thermal aging of wood plastics without adding binders on bioactivated press raw materials are analyzed. It has been established that during the heat treatment of wood plastic without a binder on the bioactivated press raw material at a temperature of 50°C for the first 150 hours of exposure, there are processes leading to an increase in bending strength and hardness in the samples. An assumption about the nature of the processes taking place with a short and long residence time of the samples at elevated temperatures is made. At the first stage, crosslinking is observed due to methylol and hydroxyl groups of lignin and cellulose, which leads to an increase in the values of hardness and toughness, meanwhile, swelling and water absorption decrease. At the second stage, there are aging processes and the strength indexes slowly decrease, accompanied by a slight increase in water absorption and swelling of the samples. The aging of the samples is due to the destruction of chemical bonds of lignin, cellulose and its components, which play the role of a bundle in samples of wood plastic without a binder. According to the results of thermal aging of the samples, it was found that the expected lifetime of wood plastic products without a binder on bioactivated press raw materials in room conditions is 7.5 years.

Keywords: wood plastics; bioactivate press materials; thermal aging; durability; temperature effect.

Введение

Известна возможность получения древесных композиционных материалов плоским горячим прессованием из отходов деревообработки без добавления синтетических связующих – пьезотермопластиков (ПТП) или лигноуглеводных древесных пластиков (ЛУДП) [1, 2].

Анализ литературных данных [1, 2] показывает, что древесный пластик без добавления связующих веществ (ДП-БС) с высокими физико-механическими свойствами можно получить только при оптимальных режимах пьезотермической обработки органических пресс-мате риалов (древесины, одревесневших растительных остатков, гидролизного лигнина) в герметизированном пространстве (в закрытых пресс-формах).

Проблема устранения низких показателей пластично-вязкостных свойств пресс-композиции ДП-БС без использования химических реагентов может быть решена с помощью предварительной биологической трансформации и частичной деструкции измельченной древесины — ее биоактивации [3].

Основной целью данной работы являлось прогнозирование возможных сроков эксплуатации изделий на основе древесного пластика без добавления связующего (ДП-БС), биоактивированного иловой смесью (ДП-БС (ИС)) и модифицированного гидролизным лигнином (ДП-БС (ИС+ГЛ)) в отапливаемых помещениях по результатам теплового старения.

Методика исследования. Для прогноза долговечности полимерных материалов широко применяют метод ускоренного теплового старения, когда по скорости изменения свойств материала при повышенной температуре определяют экстраполяцией изменение тех же свойств материала при нормальной температуре. Метод ускоренного теплового старения применим и для древесных пластиков, в частности древесностружечных плит, состоящих из 85–90 % древесных частиц и 10–15 % синтетического связующего [4].

Для проведения испытаний были изготовлены образцы-диски ДП-БС (ИС+ГЛ) и ДП-БС (ИС) диаметром 90 мм и толщиной 2 мм методом горячего прессования в закрытых пресс-формах согласно технологическому режиму, представленному в табл. 1.

Таблица 1

Режим прессования образцов-дисков

Параметр	Показатель
Давление прессования, *МПа*	40
Температура прессования, *°C*	180
Масса пресс-материала, *г*	18
Время прессования, *мин*	10
Время охлаждения	10
Время кондиционирования, *ч*	24

В качестве пресс-сырья использовались древесные отходы на основе соснового опила. Для биологической активации пресс-сырья применялись активный ил в виде иловой смеси и гидролизный лигнин, активированный методом кавитации. Влажность пресс-матери ала составила 12 % [3].

После кондиционирования образцы-диски выдерживались в термошкафу при температуре 50 °C в течение 50, 100, 150, 200 и 400 ч.

По истечении указанных промежутков времени образцы-диски кондиционировались при комнатной температуре, и определялись следующие физико-механи ческие показатели: плотность, прочность при изгибе, модуль упругости при изгибе, твердость по Бринеллю, водопоглощение, разбухание и ударная вязкость [5–9].

Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Установлено, что введение в состав пресс-компози ции гидролизного лигнина приводит к повышению прочности при изгибе образцов ДП-БС (ИС+ГЛ) в первые часы термообработки (до 150 ч) с 7,1 до 10,6 МПа за счет завершения процесса формирования пластика.

В процессе пьезотермической обработки древесины из нее удаляются летучие и выделяются, в частности, органические кислоты. Согласно работам [10–12], в ДП-БС возможна поликонденсация компонентов древесины (лигнина) по предполагаемой схеме (рис. 1).

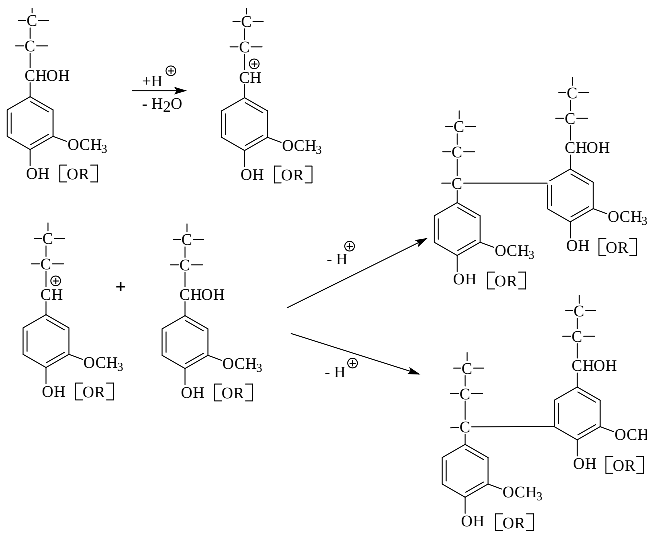


Рис. 1. Схема поликонденсации лигнина

Известно, что реакция поликонденсации лигнина протекает как в кислой, так и в щелочной средах, причем в сильнокислой среде конденсация фрагментов лигнина может приводить к образованию очень прочной трехмерной сетки, что обуславливает возрастание прочности при изгибе. pH водной вытяжки сосновых опилок составляет 4,7–4,8, и это способствует протеканию вышеуказанных процессов.

При первых 150 ч термообработки наблюдается увеличение физико-механических свойств пластика. При дальнейшей выдержке ДП-БС (более 150 ч) наблюдается снижение прочности при изгибе до 9 МПа, а также снижение твердости с 22,8 до 21,8 МПа, которое обусловлено частичной деструкцией фрагментов гидролизного лигнина и других компонентов древесины.

При экспозиции образцов ДП-БС (ИС) до 150 ч наблюдается увеличение показателя водопоглощения (до 70,8 %), которое обусловлено удалением летучих компонентов из капилляров древесных частиц (см. табл. 2). После 150 ч обработки происходит резкое снижение данного показателя до первоначальных значений образцов, которые не прошли термообработку.

Таблица 2

Физико-механические свойства ДП-БС после термовыдержки

Показатель	ДП-БС (ИС+ГЛ)						ДП-БС (ИС)					
	Выдержка, *ч*											
	0	*50*	*100*	*150*	*200*	*400*	*0*	*50*	*100*	*150*	*200*	*400*
Плотность, *кг/м*^{3}	949	1017	982	959	1105	1024	1152	1088	1073	1081	1046	1095
Прочность при изгибе, *МПа*	7,1	7,1	9,5	10,6	10,0	9,0	10,7	11,8	10,9	12,6	13,6	14,3
Твердость, *МПа*	23,0	22,8	20,1	21,7	20,8	21,9	20,3	15,7	20,5	16,7	21,9	21,8
Водопоглощение за 24 ч, *%*	42,8	43,9	42,4	39,4	39,9	36,5	43,2	54,2	70,8	66,3	58,6	42,9
Разбухание за 24 ч, *%*	3,4	5,3	2,8	2,7	3,0	2,6	4,0	4,8	6,4	6,1	6,5	3,9
Ударная вязкость А, *кДж/м*^{2}	1,3	1,4	1,6	1,6	1,6	1,8	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3

Для образцов древесного пластика, модифицированного лигнином (ДП-БС (ИС+ГЛ)), на протяжении всего периода выдержки происходит снижение водопоглощения (с 43,2 до 36,5 %). Это обусловлено наличием гидролизного лигнина, который является гидрофобным ароматическим полимером.

Для прогноза долговечности по данным ускоренного теплового старения для образцов ДП-БС (ИС) был использован экстраполяционный метод по ГОСТ 9.707-81 «Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение» [13], который широко применяется для прогноза долговечности древесных композиционых материалов.

Чтобы осуществить прогноз долговечности по этому методу, необходимы следующие условия:

– знание физической сущности и механизма процесса, протекающего при старении;

– наличие математической функции для описания процесса старения во времени.

Тогда долговечность материала в реальных условиях эксплуатации ($\tau_{реал}$) вычисляют по уравнению (1):

$$\tau_{иск} = \tau_{реал} \cdot e^{\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{иск}} - \frac{1}{T_{экв}}\right)}, \qquad (1)$$

где $\tau_{иск}$, $T_{иск}$ — долговечность и температуры в условиях ускоренных испытаний, *ч*, *K*; $\tau_{реал}$, $T_{экв}$ — долговечность и температуры в реальных условиях эксплуатации, *ч*, *K*; E_a — энергия активации процесса деструкции (старения), *Дж/моль*.

Согласно уравнению (1), для расчета $\tau_{реал}$ необходимы следующие данные:

1. Продолжительность теплового старения или долговечность изделий в искусственных условиях испытаний при ($\tau_{иск}$) высоких температурах до достижения предельного значения исследуемого свойства.

2. Эффективная энергия активации процесса старения E_a.

3. Реальная (эквивалентная) температура эксплуатации $T_{экв}$.

Результаты многолетних исследований и литературные данные свидетельствуют о том, что древесные композиционные материалы считаются пригодными для эксплуатации, если они сохраняют до 80 % своей первоначальной прочности [4].

В данной работе использование значений прочностных показателей контрольных образцов не является допустимым, так как проведенные испытания показали, что у образцов вначале происходит улучшение первоначальных прочностных показателей, а затем — сни жение не первоначальных, а уже прочностных показателей, которые сформировались в течение 150 ч термообработки.

Полученные первоначальные результаты по изменению прочности при изгибе за время термообработки были проверены на грубые промахи по Q-критерию [14].

Для сравнения различных партий и образцов ДП-БС значения прочности при изгибе приведены к одинаковой плотности пластика согласно работе [15].

Результаты приведения прочности при изгибе к плотности 1 200 кг/м^3 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения прочности при изгибе ДП-БС (ИС) от времени термообработки, приведенные к плотности 1 200 кг/м^3

Пластик	Прочность при изгибе, *МПа*					
	Выдержка, *ч*					
	0	50	100	150	200	400
ДП-БС (ИС)	11,1	13,7	12,3	12,9	–	12,7

Полученную зависимость аппроксимировали с помощью логарифмической функции (при построении графических зависимостей были исключены значения, относящиеся к первоначальному времени термообработки, которые обусловлены продолжающимися процессами формирования пластика, а не процессами разрушения материала) (рис. 2), и она имеет следующий вид с указанием коэффициента достоверности (2):

$$y = –0,4882\text{Ln}(x) + 15,525,\ R^2 = 0,939 \qquad (2)$$

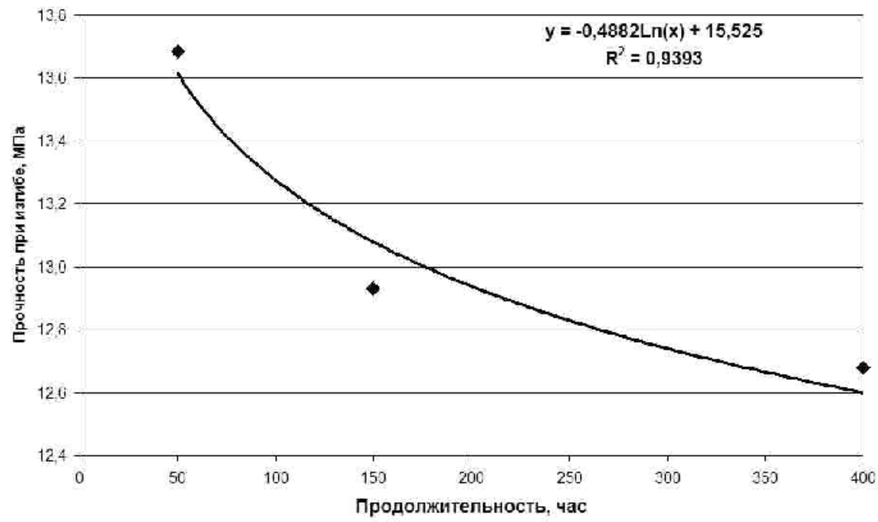


Рис. 2. Зависимость продолжительности выдержки от прочности при изгибе для ДП-БС (ИС)

По графической зависимости принимается прочность при изгибе, при которой начинается разрушение пластика на основе ДП-БС (ИС), равная 13,4 МПа.

По уравнению (2) определен срок старения дисков в условиях ускоренных испытаний ($\tau_{иск}$) для ДП-БС (ИС), равный 77,48 ч.

Процесс термоокислительной деструкции полимеров применим и для древесных композиционных материалов. Считаем, что процесс протекает по цепному механизму. Тогда константа скорости такого процесса зависит от температуры по экспоненциальному закону (3):

$$K = a \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (3)$$

где K — константа скорости реакции, c^{-1}; E_a — энергия активации процесса деструкции, *Дж/моль*; R — универсальная газовая постоянная, R = 8,31 *Дж/(К·моль)*; T — температура, *К*; a — предэкспоненциальный множитель.

Для определения кинетического порядка реакции был использован графический метод, который заключается в нахождении прямолинейной зависимости в соответствующих координатах. Установлено, что для ДП-БС (ИС) процесс термоокислительной деструкции протекает по реакции нулевого порядка и имеет вид:

$$y = 9250\,x + 1E + 07 \text{ (Па)}, R^2 = 0,81.$$

Значение энергии активации (E_a) определено по тангенсу угла наклона по следующей зависимости (4):

$$E_a = \text{tg}\alpha \cdot 2,3 \cdot R\,. \quad (4)$$

Энергия активации процесса старения, вычисленная по уравнению (4), для ДП-БС (ИС) равна 177 кДж/моль.

Согласно литературным данным, энергия активации процесса деструкции, характерная для химических компонентов древесины (лигнина, целлюлозы и ее производных), равна 150–200 кДж/моль.

Выводы

Таким образом, найденные величины энергии активации свидетельствуют о том, что в процессе выдержки при повышенных температурах старение изделий на основе соснового опила без синтетического связующего, скорее всего, протекает за счет деструкции химических связей лигнина и целлюлозы.

Предполагается использовать изделия из данных материалов в комнатных условиях помещений [13], тогда $T_{экв}$ принимается равным 20 °С (293,15 К).

При определении долговечности материала в реальных условиях эксплуатации ($\tau_{реал}$) уравнение (1) принимает вид:

$$77,48 = \tau_{реал} \cdot e^{\frac{177\cdot10^3}{8,31}\left(\frac{1}{323,15}-\frac{1}{293,15}\right)}.$$

При решении относительно $\tau_{реал}$ значение времени эксплуатации данных пластиков в реальных условиях для ДП-БС (ИС) равно 65 966 ч (7,5 лет).

Относительно небольшой прогнозируемый срок эксплуатации образцов ДП-БС (ИС) свидетельствует об образовании недостаточно частой сетки при формировании пластика.

Литература

1. Минин А.Н. Технология пьезотермопластиков. М.: Лесная промышленность, 1965. 296 с.

2. Петри В.Н. Плитные материалы и изделия из древесины и других одресневевших остатков без добавления связующих. М.: Лесная промышленность, 1976. 360 с.

3. Савиновских А.В., З.Ф. Хуснутдинова З.Ф., Артемов А.В. Исследование физико-механических свойств древесно-композиционных материалов без добавления связующих веществ, полученных на основе активированного пресс-сырья // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2014. Т. 17, № 17. С. 130-133.

4. Хрулёв В.М., Мартынов К.Я. Долговечность древесностружечных плит. М.: Лесная промышленность, 1977. 168 с.

5. ГОСТ 10634-88. Плиты древесностружечные. Методы определения физических свойств (с изм. № 1). Введ. с 1990-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1991. 7 с.

6. ГОСТ 4648-71. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. Введ. с 1973-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1992. 12 с.

7. ГОСТ 4670-77. Пластмасса и эбонит. Метод определения твёрдости вдавливанием шарика. Введ. с 1993-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1992. 6 с.

8. ГОСТ 4650-80. Пластмассы. Метод определения водопоглощения. Введ. с 1980-12-01. М.: Изд-во стандартов, 1997. 7 с.

9. ГОСТ 19109-84. Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду. Введ. с 1984-09-12. М.: Изд-во стандартов, 1984. 11 с.

10. Lisperguer J., Perez P., Urizar S. Structure and thermal properties of lignins: characterization by spectroscopy and differential scanning calorimetry // J. Chil. Chem. Soc. 2009. Vol. 54, № 4. P. 460-463.

11. Doherty W. O.S., Mousavioun P., Fellows Ch.M. Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers // Industrial Crops and Products. 2011. № 33. P. 259-276.

12. Jasiukaityte E., Kunaver M., Crestini C. Lignin behavior during wood liquefaction – Characterization by quantitative 31P, 13C NMR and size-exclusion chromatography // Catalysis Today. 2010. № 156. P. 23-30.

13. ГОСТ 9.707-81. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. Введ. с 1983-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1990. 80 с.

14. Walkenbach J. Excel 2013 Bible. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 1059 p.

15. Артёмов А.В. Разработка технологии получения изделий экструзией из древесных отходов без добавления синтетических связующих: автореф. дис. … канд. тех. наук. Екатеринбург, 2010. 16 с.

References

1. Minin A.N. Technology of piezotermoplastics. M.: Lesnaya promyshlennost', 1965. 296 p.

2. Petri V.N. Plate materials and products made of wood and other lignified residues without the addition of binders. M.: Lesnaya promyshlennost', 1976. 360 p.

3. Savinovskikh A.V., Z.F. Khusnutdinova Z.F., Artemov A.V. Investigation of physical and mechanical properties of wood-composite materials without the addition of binders obtained on the basis of activated press raw materials // Herald of Kazan Technological University. 2014. T.17, № 17. P. 130-133.

4. Khrulev V.M., Martynov K.Ya. Durability of particle board. M.: Lesnaya promyshlennost', 1977. 168 p.

5. GOST 10634-88. Divided chipboards. Methods for determining physical properties (with a change in No. 1). Vved. s 1990-01-01. M.: Izd-vo standartov, 1991. 7 p.

6. GOST 4648-71. Plastics. Static bending test method Plastmassy. Vved. s 1973-01-01. M.: Izd-vo standartov, 1992. 12 p.

7. GOST 4670-77. Plastic and ebonite. Method for determining the hardness of ball pressing. Vved. s 1993-01-01. M.: Izd-vo standartov, 1992. 6 p.

8. GOST 4650-80. Plastics. Method for determination of water absorption. Vved. s 1980-12-01. M.: Izd-vo standartov, 1997. 7 p.

9. GOST 19109-84. Plastics. Method for determination of Izod impact strength. Vved. s 1984-09-12. M.: Izd-vo standartov, 1984. 11 p.

10. Lisperguer J., Perez P., Urizar S. Structure and thermal properties of lignins: characterization by spectroscopy and differential scanning calorimetry // J. Chil. Chem. Soc. 2009. Vol. 54, № 4. P. 460-463.

11. Doherty W. O.S., Mousavioun P., Fellows Ch.M. Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers // Industrial Crops and Products. 2011. № 33. P. 259-276.

12. Jasiukaityte E., Kunaver M., Crestini S. Lignin behavior during wood liquefaction - Characterization by quantitative 31P, 13C NMR and size-exclusion chromatography // Catalysis Today. 2010. № 156. P. 23-30.

13. GOST 9.707-81. Unified system of protection against corrosion and aging. Polymeric materials. Methods of accelerated testing for climatic aging. Vved. s 1983-01-01. M.: Izd-vo standartov, 1990. 80 p.

14. Walkenbach J. Excel 2013 Bible. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 1059 p.

15. Artemov A.V. Development of the technology of extrusion from wood wastes without the addition of synthetic binders: avtoref. dis. … kand. tekh. nauk. Ekaterinburg, 2010. 16 p.

УДК 630.383 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-126-129

Анализ и разработка транспортных схем нормальных направлений грузопотоков лесоматериалов

В.А. Иванников

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева 8, Воронеж, Россия
chonochka@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9885-4586
Статья поступила 5.02.2018, принята 15.02.2018

Установлено, что рационализация перевозок грузов на основе разработки и внедрения схем нормальных направлений грузопотоков (СННГ) требует, наряду с организационно-техническими мероприятиями, выполнения большого объема вычислительных работ и трудоемких операций по подготовке необходимой для расчетов информации. Поэтому на практике приходится считаться с указанными обстоятельствами и выбирать исходные предпосылки и периодичность расчетов с учетом определения наиболее устойчивых направлений грузопотоков и реальных возможностей вычислительных систем. С этой целью чаще всего применяют агрегирование исходных данных в транспортной или административно-территориальной форме, в результате чего оптимизационные расчеты получаются проще. В то же время такой подход допускает заметную погрешность в пределах уровня агрегирования и связан с дополнительными затратами по укрупнению данных и расшифровке результатов. В практических приложениях агрегирование требует соответствующего обоснования и обычно допустимо (ввиду определенной устойчивости решения рассматриваемого класса задач к изменениям данных) при определении магистральных направлений грузопотоков на перспективу. Выявлено, что для грузов с ограниченными зонами распространения, сезонностью перевозок, выраженной динамичностью производства и потребления, а также в условиях изменения конфигурации и эксплуатационных характеристик сети необходимо разрабатывать СННГ с большей детализацией в пределах отдельных полигонов с учетом направлений, установленных общественными схемами. При этом появляется реальная возможность оперативнее учитывать изменения влияющих на СННГ факторов, своевременно корректировать схемы и эффективнее использовать их на полигонах транспортной сети при оптимизации перевозок грузов.

Ключевые слова: система; транспорт; лесоматериалы; потоки; структура; перспективное планирование; моделирование; алгоритм; метод; производство; технологическая операция; оптимизация; управление.

Analysis and development of transport schemes for adequate schemes for timber cargo traffic

V.A. Ivannikov

Voronezh State University of Forestry and Technologies under name of G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia
chonochka@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9885-4586
Received 5.02.2018, accepted 15.02.2018

It has been established that the rationalization of cargo transportation on the basis of the development and implementation of adequate schemes for cargo traffic requires, along with organizational and technical measures, the implementation of a large amount of computational work and labor-intensive operations to prepare the information necessary for calculations. Therefore, in practice, one must take into account these circumstances and choose the initial assumptions and periodicity of calculations, considering the definition of the most stable directions of cargo flows and the real capabilities of computer systems. For this purpose, the aggregation of the source data in the transport or administrative-territorial form is most often used, as a result of which the optimization calculations are made easier. At the same time, such an approach allows a significant error within the level of aggregation and is associated with additional costs for the enlargement of data and interpretation of the results. In practical applications, aggregation requires an appropriate justification and is usually permissible (in view of the certain stability of the solution of the class of problems under consideration to data changes) in determining the trunk directions of cargo flows for the future. It was revealed that for cargo with limited distribution zones, seasonality of traffic, pronounced dynamics of production and consumption, as well as in conditions of changing configuration and operational characteristics of the network, it is necessary to develop schemes with more detail within individual ranges, taking into account the directions established by public schemes. At the same time, there is an opportunity to take into account changes in the factors influencing the schemes for cargo traffic faster, to correct them in a timely manner and to use them more efficiently at the transport network polygons when optimizing cargo transportation.

Keywords: system; transportation; timber; streams; structure; forward planning; modeling; algorithm; method; production; process operation; optimization; management.

Введение

Для расчета региональных транспортных схем с учетом сетевых направлений грузопотоков необходимо унифицировать описание последних. Это связано с тем, что применяемые формы описания схем грузопотоков лесоматериалов часто содержат формулировки, не поддающиеся однозначной формализации.

Наиболее целесообразно решение данной задачи на сети с «удлиненными» дугами или с запретами на матрице, так как реализация алгоритма при этом всегда приводит к конечному результату. Однако получаемое решение может содержать встречные перевозки на отдельных участках или запрещенные корреспонденции на матрице, окончательные выводы по которым могут быть сделаны лишь на основе тщательного анализа [1, 2].

Математическая формализация рассматриваемой задачи, включающая две ее разновидности, обусловленные особенностями описания общесетевых схем, заключается в следующем [3, 4].

Постановка и решение задачи. Модель транспортной сети для решения рассматриваемой задачи описывается следующим образом [5; 6]. Задан конечный связный граф, изображающий схему железных дорог:

$$G=(V,\upsilon)\equiv(V,r),$$

где V,υ — множества соответственно вершин сети и ориентированных ребер (участков), соединяющих вершины графа; r — отображение множества V самого на себя.

Отдельный полигон сети представляется в виде подграфа G'' графа G, который может быть определен так:

$$G''=(V'',И'')\equiv(V'',r''),\quad V''\subset V,\quad И''\subset И. \qquad (2)$$

$$r''\upsilon=(r\upsilon)\cap V''.$$

При этом элементами множества V'' являются все пункты полигона и стыковые пункты с соседними полигонами, а элементами множества $И''$ — упорядоченные пары ($\upsilon_i\,;\upsilon_j$).

Если кратчайший путь между какими-либо пунктами включает участки других полигонов, то следует расширить множество $И''$ и соответственно отображение r'', включив в них условные дуги между выходными и входными пунктами полигона на данном пути. Иначе, если кратчайший путь из υ_i' в υ_j' проходит за пределы полигона через υ_{i_1}'' и входит через υ_{j_1}'', будем считать, что:

$$(\upsilon_{i_1}'',\upsilon_{j_1}'')\in И'',\quad \upsilon_{j_1}''\in r''\upsilon_{i_1}''. \qquad (3)$$

Общесетевые схемы нормальных направлений грузопотоков (СННГ) на сети представляются как некоторые ориентированные графы G_Δ без контуров, являющиеся по отношению к графу G частичными графами, содержащими все его вершины и только часть его дуг:

$$G_\Delta=(V,U_\Delta),\quad U_\Delta\subset U. \qquad (4)$$

На полигоне дороги сетевая СННГ изображается в виде частичного графа G_Δ'', определяемого соотношением:

$$G_\Delta''(V'',U_\Delta'')=G_\Delta(V,U_\Delta)\cap G''(V''U''),\quad U_\Delta''=U_\Delta\cap И. \qquad (5)$$

Для формирования расчетной транспортной сети построим граф $G''\Delta^*$, обратный графу G_Δ'', и ориентированный граф следующим образом:

$$G_\Delta''^*=(V_1'',U_\Delta''^*);\quad G_z''=(V_1'',U_z'');\quad U_z''=U''-U_\Delta''^* \qquad (6)$$

где $U_\Delta''^*$ — множество дуг, противоположных дугам множества $И_\Delta''$.

Тогда сеть для расчета на выделенном полигоне может быть изображена в виде графа G_Z'', дугам которого поставлены в соответствие некоторые положительные числа (расстояние, время, издержки и т. п.) [7, 8]. Чтобы обеспечить выполнение вычислительных процедур на ЭВМ с выдачей конечных результатов, выделим в множестве U'' подмножества $И_\Delta''$ и $U_\Delta''^*$ и поставим в соответствие дугам графа G некоторые положительные числа из соотношения:

$$f(U'')=\begin{cases} f(И''), И''\in И_z \\ M\geq \max f(И''), И''\in U_\Delta''^* \end{cases} \qquad (7)$$

Для математической постановки однопродуктовой транспортной задачи по полученной сети зададим на множестве U'' функции $d(И'')$ пропускных способностей по дугам данного груза, а на множестве V'' определим функции $a_i(\upsilon'')$ производства и потребления. Последние принимают значения $a_i\,(i\in J')$ в пунктах производства и $b_j\,(j\in J'')$ — в пунктах потребления. Здесь J',J'' — множества индексов соответственно пунктов производства и потребления [9]. Тогда рассматриваемая задача формируется следующим образом.

В области Z, определяемой ограничениями:

$$1)\ \sum_{И''\in И_r''-}\bar{X}_r(И'')-\sum_{И''\in И_r''+}r(И'')=\begin{cases} a_r, r\in J', \\ -b_r, r\in J'', \\ 0, r\in J_t; \end{cases} \qquad (8)$$

$$2)\ 0\leq X(И'')\leq d(И''),\quad И''\in U'', \qquad (9)$$

где $И_r''-, И_r''+$ — множества исходящих и соответственно входящих дуг вершины $r\ (r=1,|U''|)$; J_t — множество индексов транзитных пунктов, задана целевая функция $F(x(И''))$. Требуется найти такой поток $\bar{X}(И'')$, чтобы было справедливо равенство:

$$F\left(\overline{X}\left(И''\right)\right)=\sum P\left(И''\right)\overline{X}\left(И''\right)= \\ =\min F\left(X\left(И''\right)\right), \quad X\left(И''\right)\in Z \qquad (10)$$

Здесь $\overline{X}(И'')$ — вектор с числом компонент, равным мощности множества $И''$.

Первые ограничения означают соответственно:

Or — для пунктов отправления разность между суммами сдачи и приема равна ресурсам поставщика;

br — для пунктов назначения разность между суммами приема и сдачи равна величине прибытия груза в данный пункт;

нуль — для транзитных пунктов, когда прием и сдача груза должны быть равны. Второе условие означает, что каждая компонента вектора $\overline{X}(И'')$ неотрицательна и не превышает заданной по дуге пропускной способности.

Количественные оценки ресурсов поставщиков по отправлению грузов из класса k в плановом периоде (a_i), а также потребностей в этих грузах по каждому пункту назначения (b_j) определяются на основе плановых или отчетных данных с учетом динамики их изменения за прошедший период и намечаемой перспективы.

Рационализация перевозок грузов на основе разработки и внедрения СННГ требует, наряду с организационно-техническими мероприятиями, выполнения больших вычислительных работ и трудоемких операций по подготовке необходимой для расчетов информации. С этой целью чаще всего применяют агрегирование исходных данных в транспортной или административно-территориальной форме, в результате чего оптимизационные расчеты получаются проще.

В практических приложениях агрегирование требует соответствующего обоснования и обычно допустимо (ввиду определенной устойчивости решения рассматриваемого класса задач к изменениям данных) при определении магистральных направлений грузопотоков на перспективу. Для грузов с ограниченными зонами распространения, сезонностью перевозок, выраженной динамичностью производства и потребления, а также в условиях изменения конфигурации и эксплуатационных характеристик сети необходимо разрабатывать СННГ с бо̀льшей детализацией в пределах отдельных полигонов с учетом направлений, установленных общественными схемами.

При этом появляется реальная возможность оперативнее учитывать изменения влияющих на СННГ факторов, своевременно корректировать схемы и эффективнее использовать их на полигонах транспортной сети при оптимизации перевозок грузов.

В сложившейся практике общественные СННГ задаются, в частности, одним из следующих способов.

В одном случае для пунктов погрузки указываются участки или пункты назначения как в местном, так и в прямом сообщении с учетом максимальной пропускной возможности транспортной системы. Тем самым однозначно определяются направления грузопотоков, а их графическое представление не вызывает затруднений.

В других случаях, в качестве разрешенных назначений указываются целые районы (с выделением отдельных участков), административно-территориальные единицы и т. п. При этом, если по указанному назначению удается выделить подмножество пунктов или участков, то разрешенные направления грузопотоков можно однозначно представить по схеме транспортной сети.

Значительной неопределенностью отличается случай, когда для группы пунктов отправления в качестве назначений указываются отдельные административно-территориальные или производственные единицы. В этом случае на схеме направления грузопотоков однозначно не определяются, и в пределах уровня агрегирования появляется погрешность в виде отдельных встречных перевозок, которая тем значительнее, чем выше уровень агрегирования [4].

Метод оценки производительной допустимости транспортной системы состоит в следующем.

Допустимость транспортной системы определяется ее продуктивной силой (P_T), которую определяем по формуле:

$$P_T = W_Ц \cdot Ц, \qquad (11)$$

где: $W_Ц$ — вместимость системы (в $м^3$, единиц подвижного состава); $Ц$ — период циклов (оборотов) подвижного состава за год.

Тогда емкость лесотранспортной системы можно определить:

$$W_Ц = N_p P_{CT}, \qquad (12)$$

где N_p — количество подвижного состава; P_{CT} — грузоподъемность единиц подвижного состава.

Количество циклов $Ц$:

$$Ц = \frac{365}{O_T}, \qquad (13)$$

где O_T — время грузооборота транспортных средств. Подставляя формулы (12) и (13) в (11), получим:

$$P_T = N_p P_{CT} \frac{365}{O}. \qquad (14)$$

Расчет производительности железнодорожного подвижного состава по времени грузооборота между грузообрабатывающими станциями является основной характеристикой определения эффективности функционирования всей транспортной системы.

Другим важным показателем является оборачиваемость железнодорожного подвижного состава [2]:

$$O_в = t_{дв} + t_{пр} + t_{гр} + t_{пер} + t_{б/пер}, \qquad (15)$$

где $t_{дв}$ — время нахождения в пути, $ч$; $t_{пр}$ — простой вагонов на промежуточных станционных пунктах, $ч$; $t_{гр}$ — общее время простоя вагона под погрузочными операциями, $ч$; $t_{пер}, t_{б/пер}$ — временные периоды на технических перегонах, $ч$.

Тогда соотношение (5) можно представить:

$$t_{дв} = \frac{l_p}{\upsilon_T}, \qquad (16)$$

где l_p — расстояние оборота вагона, *км*; υ_T — скорость грузовых локомотивов, *км/ч*;

$$t_{пр} = \frac{l_p}{\upsilon_y} - \frac{l_p}{\upsilon_T}; \quad (17)$$

где υ_y — поучастковая техническая скорость локомотива, *км/ч*;

$$t_{гр} = \kappa_м \bar{t}_{гр}, \quad (18)$$

где $\kappa_м$ — поправочный коэффициент к среднему времени нахождения вагонов в пунктах погрузки, $0 < \kappa_м \le 2$; $\bar{t}_{гр}$ — продолжительность грузовой операции, *ч*;

$$t_{пер} = \frac{l_p}{L_м} \bar{t}_{пер}, \quad (19)$$

где $L_м$ — расстояние между грузовыми станциями, *км*; $\bar{t}_{пер}$ — время простоя на технических перегонах, *ч*;

Тогда:

$$t_{T/пер} = \left(\frac{l_p}{L'_в} - \frac{l_p}{L_м} \right) \cdot \bar{t}_{б/пер}, \quad (20)$$

где $L'_в$ — продолжительность маршрута между техническими перегонами, *ч*; $\bar{t}_{б/пер}$ — средний период простоя вагона на технических перегонах без перегрузочных операций, *ч*.

Представленные выше выражения по определению производительности железнодорожной транспортной системы позволяют:

– определить основные показатели, описывающие эффективность функционирования транспортной системы;

– сформировать главные технические показатели при обороте вагонов в грузовом и порожняковом направлениях.

Вывод

Применение указанных подходов в процессах поставок лесоматериалов железнодорожным транспортом позволяет вырабатывать управленческие воздействия на транспортные подсистемы низшего уровня построения иерархической структуры.

Литература

1. Пильник Ю.Н., Сушков С.И., Арутюнян А.Ю. Методика определения оптимальной структуры парка транспортно-технологических машин [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22674 (дата обращения: 27.01.2018).

2. Сушков С.И., Бурмистрова Ю.Н., Пильник Ю.Н. Принципы решения задач управления в многоуровневых транспортно-производственных системах лесного комплекса [Электронный ресурс] // Фундаментальные исследования. 2015. № 11. URL: http://www.fundamental-research.ru/ru/ article/view?id=39332 (дата обращения: 27.01.2018).

3. Сушков С. И., Бухтияров В.Н., Иванников В.А.Математическое моделирование процессов управления техническим состоянием лесотранспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2012. № 5. С. 52-54.

4. Setinc M., Gradisar M., Tomat L. Optimization of a highway project planning using a modified genetic algorithm // Optimization. 2015. Vol. 64, Is. 3. P. 687-707.

5. Thomas J. Stahlbau Design and conctruction in existing contexts: Replacement of the first High Bridge Levensau // Janssen Thomasstahlbau. 2015. Vol. 84, Is. 3. P. 182-194.

6. Hare W., Lucet Y., Rahman F. A mixed-integer linear programming model to optimize the vertical alignment considering blocks and side-slopes in road construction // European journal of operational research. 2015. Vol. 241. Is. 3. P. 631-641.

7. Santos J., Ferreira A., Flintsch G. A life cycle assessment model for pavement management: methodology and computational framework // International journal of pavement engineering. 2015. Vol. 16, Is. 3. P. 268-286.

8. Liyanage C., Villalba-Romero L. Measuring Success of PPP Transport Projects: A Cross-Case Analysis of Toll Roads // Transport reviews. 2015. Vol. 35, Is. 2. Special Is.: SI. P. 140-161.

9. Setinc M, Lucet Y., Rahman F. Optimization of a highway project planning using a modified genetic algorithm // Optimization. 2015. Vol. 64, Is. 3. P. 687-707.

References

1. Pil'nik Yu.N., Sushkov S.I., Arutyunyan A.Yu. Method for determining the optimal fleet structure transport and technological machines [Elektronnyi resurs] // Modern problems of science and education. 2015. № 2. URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22674 (data obrashcheniya: 27.01.2018).

2. Sushkov S.I., Burmistrova Yu.N., Pil'nik Yu.N. Principles of management tasks in a multi-tier transport and production systems forest [Elektronnyi resurs] // Fundamental research. 2015. № 11. URL: http://www.fundamental-research.ru/ ru/article/ view?id=39332 (data obrashcheniya: 27.01.2018).

3. Sushkov S. I., Bukhtiyarov V.N., Ivannikov V.A. Mathematical modeling of management processes technical condition logging machines // Construction and road building machinery. 2012. № 5. P. 52-54.

4. Setinc M., Gradisar M., Tomat L. Optimization of a highway project planning using a modified genetic algorithm // Optimization. 2015. Vol. 64, Is. 3. P. 687-707.

5. Thomas J. Stahlbau Design and conctruction in existing contexts: Replacement of the first High Bridge Levensau // Janssen Thomasstahlbau. 2015. Vol. 84, Is. 3. P. 182-194.

6. Hare W., Lucet Y., Rahman F. A mixed-integer linear programming model to optimize the vertical alignment considering blocks and side-slopes in road construction // European journal of operational research. 2015. Vol. 241. Is. 3. P. 631-641.

7. Santos J., Ferreira A., Flintsch G. A life cycle assessment model for pavement management: methodology and computational framework // International journal of pavement engineering. 2015. Vol. 16, Is. 3. P. 268-286.

8. Liyanage C., Villalba-Romero L. Measuring Success of PPP Transport Projects: A Cross-Case Analysis of Toll Roads // Transport reviews. 2015. Vol. 35, Is. 2. Special Is.: SI. P. 140-161.

9. Setinc M, Lucet Y., Rahman F. Optimization of a highway project planning using a modified genetic algorithm // Optimization. 2015. Vol. 64, Is. 3. P. 687-707.

УДК 630.181 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-130-135

Повышение эффективности деятельности лесопромышленных предприятий на территории Российской Федерации

Янь Шуфан

Маньчжурский институт Университета Внутренней Монголии, ул. Хуабу 1, Маньчжурия, Китайская Народная Республика
egg500500@sohu.com
Статья поступила 10.02.2018, принята 20.02.2018

Исторически сформировавшаяся роль России как сырьевой страны, а также насыщенность рынка в странах с развитой экономикой могут затормозить выход российских производств на мировой рынок продукции с глубокой степенью переработки. Осложняет ситуацию экспорт из России необработанной древесины — круглых лесоматериалов, что фактически способствует развитию деревоперерабатывающих производств в Китае и Корее. В статье отмечены причины низкой доли продукции лесопромышленного комплекса России в мировом объеме производства, хотя природно-климатические условия страны делают возможной заготовку древесины высокого качества. Обозначены вызовы и угрозы развитию Сибири. Приведены пути повышения эффективности лесопромышленного комплекса в Российской Федерации — лесозаготовительного, лесовосстановительного и лесоперерабатывающего производств. Прописаны различные сценарии развития Сибири, конкурентные преимущества социально-экономического развития Иркутской области. Реализация сценария социально-экономического развития Сибири должна обеспечить модернизацию и технологическое перевооружение отраслей традиционного производства, что позволит повысить экологичность сибирских территорий при увеличении безопасности промышленных объектов и наращивании экспорта готовых продуктов с высокой долей добавленной стоимости.

Ключевые слова: лесозаготовка; лесовосстановление; лесопереработка; диверсификация производства; стратегия развития.

Increase in efficiency of activity of the timber industry enterprises in the territory of the Russian Federation

Yen Shufang

Manchurian Institute of Inner Mongolian University; 1, Huabu St., Manzhouli, China
egg500500@sohu.com
Received 10.02.18, accepted 20.02.2018

Historically created role of Russia as a country of raw materials and also market saturation in the countries with developed economy can slow down the entry of the Russian companies into the world production market with deep extent of processing. Export of the raw wood from Russia , namely, round forest, complicates the situation and actually contributes to the development of wood processing productions in China and Korea. The article considers the reasons of a low share of production of timber processing complex of Russia in the world output, though climatic conditions of the country make it possible to produce wood of a high quality. Demands and threats to the development of Siberia are singled out. The ways of increase in efficiency of timber processing complex in the Russian Federation are given: logging, reforestation and wood-processing productions. Various scenarios of development of Siberia, competitive advantages of social and economic development of the Irkutsk region are registered. Implementation of the scenario of social and economic development of Siberia is aimed at modernization and technological reconstruction of branches of traditional production of Siberia which will allow to provide increase in environmental friendliness of the Siberian territories, increases in safety of industrial facilities, export from Siberia of ready-made products with a high share of the added cost.

Keywords: logging; reforestation; wood processing; production diversification; development strategy.

Введение

В настоящее время основными поставщиками лесопромышленной продукции на мировом рынке являются США, Китай, Канада, Германия и Финляндия.

Доля лесного комплекса России в ВВП страны сегодня оценивается в 0,7 %, что существенно ниже уровня его возможностей.

По масштабам лесных запасов Россия занимает 1-е место в мире — на ее территории расположено порядка 25 % мировых запасов леса. Расчетная лесосека с 2010 г. имеет тенденцию к увеличению: в 2010 г. она составляла 633,92 млн $м^3$, в 2011 г. — 666,17 млн $м^3$, к 2020 г., по прогнозу, объем составит 700 млн $м^3$, к 2030 г. — 710 млн $м^3$ [1].

Низкая доля продукции лесопромышленного комплекса России на мировом рынке обусловлена следующими причинами:

– экстенсивными методами лесозаготовок, основанными на использовании малонарушенных лесов;
– невысоким уровнем освоения расчетной лесосеки;
– применением устаревших технологий деревообработки с большим количеством образующихся отходов, не используемых в дальнейшем;
– истощением лесов (сырьевой базы) в районах, где расположены предприятия лесозаготовки;
– непрозрачностью рынков лесной продукции, что поощряет появление «серой» продукции;
– необходимостью перевозок заготовленных лесоматериалов по железной дороге на значительные расстояния (эффективная экономика лесопромышленного комплекса предполагает плечо доставки сырья не более 200 км);
– низкой глубиной переработки сырья и высокой энергоемкостью производства;
– низкой рентабельностью отечественных производств [2].

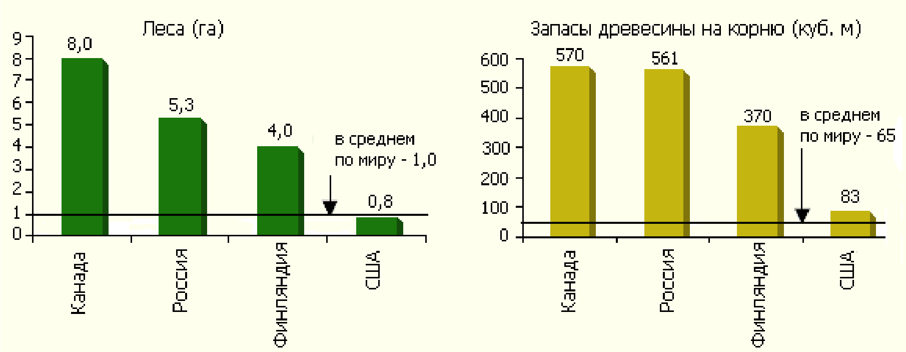


Рис. 1. Сравнительный анализ запасов древесины в разных странах

При этом природно-климатические условия сибирского региона дают все возможности для заготовки высококачественной древесины.

В связи с вышеизложенным поиск путей повышения эффективности лесопромышленного комплекса в Российской Федерации является актуальной задачей.

Целью исследований является повышение эффективности лесозаготовительного, лесовосстановительного и лесоперерабатывающего производств применительно к специфике сибирского региона.

Методика исследования. В качестве методов исследования приняты анализ различных источников по проблеме, опыт малых лесопромышленных предприятий, экспертные оценки.

Основные вызовы и угрозы развитию Сибири включают следующие факторы [3]:

1) изменения цен на необработанную древесину на мировом рынке, снижающие инвестиционную привлекательность Сибири для бизнеса. Диверсификация экономики Сибири позволит снизить значимость этого фактора;

2) неблагоприятные условия для вывоза капитала в европейскую часть страны и за границу. Размеры такого вывоза сопоставимы с валовым региональным продуктом Сибири;

3) обусловленность экономики географическим расположением сибирского региона. Негативное воздействие этого фактора будет нивелировано, в частности, при проектировании и создании новой сети дорог;

4) восприятие Сибири в качестве сырьевого придатка развитых регионов страны. Это актуализирует задачу диверсификации экономики регионов Сибири и создания в них комплекса деревоперерабатывающих производств. Решение этой задачи возможно при участии иностранного капитала на основе соблюдения требований законодательства Российской Федерации.

Сценарий развития Сибири увязан с инновационным сценарием Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года.

Вместе с тем в период до 2020 г. развитие сибирского региона по-прежнему будет связано с традиционными отраслями промышленности и расширенным вовлечением в оборот природных ресурсов, но с учетом увеличения доли переработки древесины в структуре валового регионального продукта Сибирского федерального округа.

В Иркутской области реализуется проект комплексного развития Нижнего Приангарья [4], в соответствии с которым на севере области запланировано развитие комплекса отраслей промышленности, в том числе лесозаготовки и глубокой переработки древесины.

Конкурентными преимуществами социально-экономического развития Иркутской области являются:

– дифференцированная структура экономики;
– мощный промышленный потенциал;
– крупнейшие в Российской Федерации объемы лесного фонда.

До 2020 г. предполагается интенсивное привлечение инноваций, в результате реализации которых запланировано осуществление технологического перевооружения традиционных отраслей по заготовке и переработке сырья (древесины) и увеличение количества производств, осуществляющих глубокую переработку лесных ресурсов.

Для реализации мероприятий комплексной переработки древесины, лесохимического производства в регионах необходимо внедрить технологии устойчивого развития лесной отрасли и создать предприятия, выпускающие экспортно-ориентированную продукцию с высокой долей добавленной стоимости. Применение технологий безотходного производства позволит обеспечить комплексное использование лесных ресурсов, улучшить экологическую ситуацию, а также уменьшить пожароопасность в регионе [5–8].

Воспроизводство лесных ресурсов предполагается осуществлять следующими путями:

– максимальной естественной восстановительной способностью и увеличением количества и качества проводимых мероприятий, оказывающих содействие естественному возобновлению;

– воспроизводством лесных насаждений на всех вырубках, где естественное возобновление не может гарантировать необходимых сроков и качества подроста;

– созданием высокопродуктивных лесных плантаций на пустующих лесных землях и неиспользуемых землях сельскохозяйственного назначения;

– проведением реконструкции малоценных насаждений;

– переходом на районирование лесов по лесовосстановительным технологиям и реализацию нормативных затрат на мероприятия по лесовосстановлению [9].

Для производства семян с улучшенными генетическими свойствами и выполнения работ по восстановлению лесов и лесовыращиванию необходимо реализовать современные методы, в том числе с использованием геномики, клонального микроразмножения и паспортизации объектов лесосеменных баз на основе генетических маркеров, что позволит существенно поднять качество и масштабы работ в области лесного семеноводства.

Диверсификация продукции, которую выпускают предприятий деревопереработки, позволит обеспечить их финансовую стабильность, увеличить отчисления в бюджеты разных уровней и, соответственно, получить бòльшую выручку от экспорта этой продукции. Использование отходов деревопереработки для получения тепловой энергии позволит снизить расходы производств и тем самым повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции [10].

Проведение модернизации технологических процессов — как лесозаготовки, так и деревопереработки — в России целесообразно осуществлять на основе государственно-частного партнерства. Предполагается, что внедрение успешных бизнес-моделей инновационных предприятий позволит снизить предпринимательские риски, упростить процедуры получения финансирования со стороны коммерческих банков и региональных бюджетов. Главным фактором, определяющим спрос на продукцию лесопромышленного комплекса в прогнозной перспективе, будет как внутреннее потребление, так и наращивание экспорта.

Развитию лесопромышленного комплекса также будет способствовать внедрение биотехнологий в производство. Крупные диверсифицированные биотехнологические предприятия, используя возобновляемые ресурсы, способны производить различные виды биотоплива.

Совместное использование современных видов биотоплива (топливных брикетов, пеллет) в индивидуальных отопительных системах позволит повысить КПД сжигания.

Реализация Комплексной программы развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года в части приоритетного направления «Лесная биотехнология» [11] приведет к созданию в стране современной системы управления лесонасаждениями с привлечением методов ДНК-маркирования, появлению новых биотехнологических форм деревьев с заданными признаками, развитию плантационного лесовыращивания, созданию условий для малоотходной переработки древесины, утилизации отходов лесопиления.

Реализация потенциала лесопромышленного комплекса связана с перспективами выхода отрасли лесозаготовок из тени, нормализации оборота леса, усиления концентрации и внедрения передовых технологий [12].

Консервативный сценарий предполагает закрепление негативных тенденций в лесопромышленном комплексе, обусловленных ростом экспорта необработанной древесины (круглого леса), что может привести к сокращению инвестиционных проектов, направленных на изготовление продукции глубокой переработки древесины с высокой добавленной стоимостью [13].

Согласно инновационному сценарию рост производства продукции лесопромышленного комплекса обусловлен прежде всего следующими факторами:

– реализацией перспективных инвестиционных проектов по технической и технологической модернизации, перевооружению и новому строительству предприятий, осуществляющих деревопереработку;

– увеличением объемов инвестиций в основной капитал;

– улучшением условий кредитования и лизинга деревообрабатывающего оборудования;

– реализацией мер государственной поддержки отрасли, направленных на адаптацию к условиям ВТО и импортозамещение.

Таким образом, комплексное решение вопросов повышения конкурентоспособности лесного комплекса Российской Федерации лежит в направлении поощрения деятельности крупных предприятий мирового уровня в российском лесопромышленном комплексе. Параллельно должны быть предприняты меры для расширения объемов потребления лесохимической и целлюлозной продукции на внутреннем рынке.

В случае реализации указанных мер поддержки лесного комплекса, способствующих реализации перспективных инвестиционных проектов по модернизации и новому строительству предприятий, увеличению объемов инвестиций в основной капитал, улучшению условий кредитования и лизинга деревообрабатывающего оборудования, адаптации отрасли к условиям ВТО и обеспечивающих импортозамещение ежегодный рост производства составит порядка 4 %.

Учитывая продолжительный период адаптации к условиям членства Российской Федерации в ВТО, необходима эффективная реализация утвержденных мер государственной поддержки лесопромышленного комплекса, а также мер по адаптации отрасли к условиям членства Российской Федерации в ВТО, в том числе направленных на повышение объемов заготовки леса.

Перспективы развития лесопромышленного комплекса связывают с возможным ростом внутреннего спроса на лесобумажную продукцию и рядом факторов, в числе которых:

– обеспечение комплексной переработки всего заготавливаемого сырья, увеличение глубины переработки сырья [14, 15];

– изготовление новых видов продукции, в том числе экспортного качества;

– оптимизация размещения предприятий лесопромышленного комплекса на территории сибирского региона с целью их кооперации;
– создание необходимой транспортной инфраструктуры.

Особо отмечается, что для модернизации существующих и создания новых предприятий по глубокой переработке древесины необходимы инвестиции в деревообрабатывающую и целлюлозно-бумажную промышленность, в том числе с участием иностранных инвесторов.

Однако привлечение иностранного капитала, в частности капитала из Китая, сталкивается с рядом трудностей:
– частые изменения в законодательстве Российской Федерации (изменения в Лесной кодекс с 2006 г. вносились 39 раз), которые сложно отследить иностранным инвесторам [16];
– сложности при оформлении разрешения на работу специалистам, не являющимся гражданами стран СНГ, в то время как специфика оборудования и инструмента производства КНР адаптирована для работы на нем специалистов из Китая [17];
– несовпадение фактических данных и расчетной лесосеки при осуществлении лесозаготовок.

На сегодняшний день правительством Российский Федерации предпринят ряд мер, касающихся ограничения экспорта необработанной древесины, для стимулирования развития внутренней деревопереработки и диверсификации рынков сбыта российской продукции, в том числе за счет производства и продажи продукции с более высокой добавленной стоимостью на мировом рынке. С 1 января 2007 г. тариф на круглый лес был установлен на уровне 6,5 %, но уже в течение года он вырос сначала до 20, а затем до 25 %. Внезапно разразившийся глобальный финансовый кризис 2008 г., резко снизив спрос на готовую продукцию деревопереработки на европейских и американских рынках, существенно уменьшил спрос на необработанную древесину в Китае. На этом фоне дальнейшее запланированное повышение экспортных пошлин поставило бы российских экспортеров в невыгодное положение по сравнению с канадскими и новозеландскими конкурентами, которые практически обнулили свои экспортные пошлины. В 2013 г. Новая Зеландия вышла в лидеры по поставкам хвойной древесины в Китай, обогнав США и Канаду, доля которых составляет 25 % от всей лесной продукции на китайском рынке.

Основная масса (83 %) сибирского и дальневосточного леса экспортируется в Китай, который заинтересован в покупке необработанных лесоматериалов или слабо переработанных пиломатериалов, так как осуществляет производство мебели, паркета и других изделий для российского рынка. При этом у Китая гораздо больше возможностей влиять на формирование закупочной цены древесины, чем у России, которая вынуждена конкурировать с другими странами — поставщиками леса. За последние 10 лет Китай стал монополистом в закупке сибирского и дальневосточного российского леса, в то время как в самом Китае импорт древесины с Сибири и Дальнего Востока занимает только 10 % от всего лесного импорта, уступая импортируемым объемам из Новой Зеландии, США и Канады. В нынешних экспортно-импортных лесных отношениях между Сибирью, Дальним Востоком России и Китаем наблюдается серьезный дисбаланс в пользу Китая.

На фоне падения экспорта в Китай необработанной древесины экспорт пиломатериалов начиная с 2009 г. вырос почти в три раза, что, очевидно, произошло из-за введения новых таможенных пошлин на необработанную древесину. Ожидается, что экспорт пиломатериалов с территории Сибири и Дальнего Востока в северо-восточные провинции Китая будет повышаться, в том числе и по причине введения запрета китайскими властями на рубку в естественных лесах. Поэтому в последнее время и в будущем китайский бизнес осуществляет строительство или покупку лесопильных предприятий в Приморском и Хабаровском краях, чтобы производить пиломатериалы, предназначенные для экспорта в Китай. Степень переработки этих пиломатериалов незначительна. Глубокая переработка древесины происходит по другую сторону российско-китайской границы, в том числе в провинции Хейлунцзян, чья экономика ориентирована на производство древесных продуктов с высокой добавочной стоимостью. Еще к началу 2000-х гг. в этой провинции для стремительно растущей деревоперерабатывающей промышленности было создано более 2 млн новых рабочих мест. С тех пор показатели развития существенно выросли и растут дальше.

В связи с повышением покупательской способности и увеличением строительных производств возрастает спрос на продукцию деревопереработки и на внутреннем китайском рынке. Сегодня Китай представляет собой самый крупный в мире рынок сбыта для мебельной продукции и напольных покрытий. Стремительное развитие лесоперерабатывающего сектора в северо-восточной части Китая происходит на фоне ужесточения китайских законов о рубке лесов естественного происхождения. Так, в 2014 г. в ведущих лесных районах северо-восточной провинции Хэйлунцзян была запущена пилотная программа, запрещающая вырубку естественных лесов на этой территории. Данная программа постепенно распространится на другие лесные регионы. К 2020 г. правительство Китая планирует полностью запретить рубку в лесах естественного происхождения, а также на 20 % сократить рубку в искусственных лесах.

Таким образом, в России продолжает работать экспортно-ориентированная модель ведения лесного хозяйства, основанная на экспорте необработанной или мало переработанной древесины. Причем использование лесных ресурсов осуществляется низкопродуктивными методами. Низкокачественная древесина или лесоматериалы небольшого диаметра, т. е. с низкой добавленной стоимостью, очень часто остаются на лесосеках. Вторичные леса с преобладанием таких малоценных мягколиственных пород, как береза и осина, или других пород деревьев с небольшим диаметром зачастую остаются нетронутыми. Лесозаготовка в основном касается больших бревен ценных пород древесины, а более мелкая древесина остается нетронутой или выброшенной лесозаготовителями, которые все больше углубляются в ранее неосвоенные лесные массивы. Но чем дальше лесозаготовительные предприятия будут продвигаться в горные районы в поисках леса, тем менее рентабельными будут заготовки древесины из-за высоких транспортных расходов.

Поэтому правительству Российской Федерации необходимо выделять средства для строительства новых лесных дорог, в том числе дорог, которые заходят на территории малонарушенных лесов.

Для получения государственных субсидий на освоение малонарушенных лесных территорий часто используется такой аргумент: официальная расчетная лесосека «не дорубается». При этом не учитывается тот момент, что расчетная лесосека включает территории, расположенные в недоступных или труднодоступных районах, а также леса, уже пройденные неучтенными незаконными рубками или уничтоженные лесными пожарами, которые не могут быть использованы в качестве ориентира для общего объема коммерческих рубок.

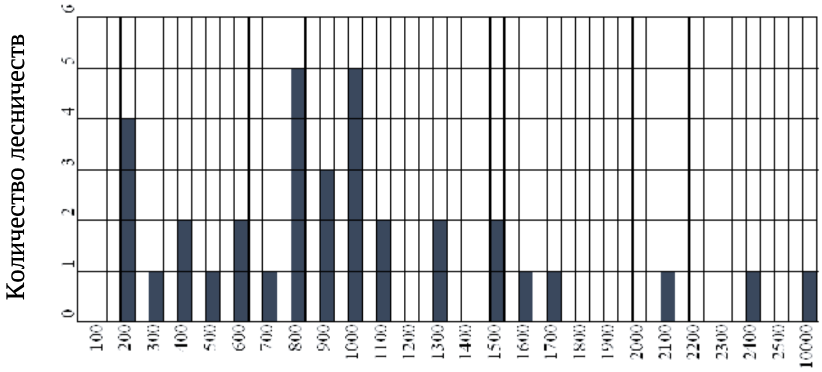


Рис. 2. Гистограмма распределения лесничеств по протяженности автомобильных дорог

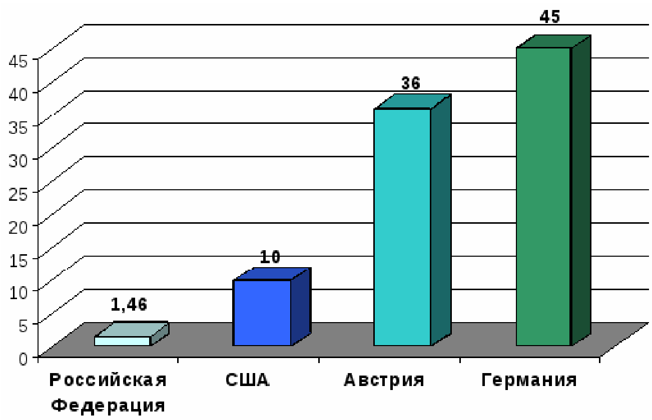


Рис. 3. Сравнительный анализ протяженности лесных дорог, км на 1 000 га лесов

Выводы

Инновационные предложения по улучшению работы лесопромышленного комплекса Российской Федерации предполагают проведение следующих мероприятий:

– создание на территории Сибири современной системы управления лесонасаждениями;

– увеличение объемов мероприятий по содействию естественному возобновлению;

– производство семян с улучшенными наследственными свойствами;

– диверсификация продукции, выпускаемой деревоперерабатывающими предприятиями;

– внедрение технологии устойчивого развития лесной отрасли и создание предприятий, выпускающих экспортно-ориентированную продукцию с высокой долей добавленной стоимости;

– распространение технологий глубокой переработки древесины;

– организация безотходных производств (использование отходов деревопереработки для получения тепла и электроэнергии);

– внедрение биотехнологий в производство.

При этом для привлечения инвестиций со стороны других стран, в частности Китая, необходимо решить ряд проблем:

– оперативно информировать инвесторов о смене российского законодательства;

– увеличить лимиты разрешения на работу специалистам из КНР;

– строить новые лесные дороги;

– провести переучет расчетной лесосеки на территории Сибири и Дальнего Востока.

Литература

1. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года (разработан Минэкономразвития России) [Элнктронный рескрс] // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультатнПлюс».

2. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года [Элнктронный рескрс]: утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 17 нояб. 2008 г. N 1662-р // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультатнПлюс».

3. Стратегия социально-экономического развития Сибири до 2020 года[Элнктронный рескрс]: утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 5 июля 2010 г. №1120-р // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультатнПлюс».

4. Комплексное развитие Нижнего Приангарья [Элнктронный рескрс]: проект, утв. М-вом энергетики Рос. Федерации 21 кт. 2008 г. // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультатнПлюс».

5. Ветшева В.Ф., Аксеновская Н.А. Современное состояние и перспективы устойчивого развития лесопиления в Сибири // Вестн. Крас. гос. аг. ун-та. 2012. № 3. С. 188-192.

6. Ветшева В.Ф., Аксеновская Н.А., Айзенберг А.И. Современные экономические и социальные проблемы развития лесопромышленного комплекса Сибири и пути их решения // Деревообрабатывающая промышленность. 2007. № 6. С. 2-5.

7. Кожухова Л.И., Беспаленко Р.О. Устойчивое развитие лесного хозяйства и смежных отраслей – основа эффективного социально-экономического развития региона // Вестн. Моск. гос. ун-та леса - Лесной вестник. 2006. № S4. С. 104-107.

8. 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.

9. Антонов А.В., Фроловичев В.Н. Об организации контроллинга в лесном комплексе России // Вестн. РАЕН. 2013. № 7. С. 86-90.

10. Мохирев А.П., Аксенов Н.В. Диверсификация лесозаготовительного производсва // Роль инноваций в трансформации современной науки: сб. ст. междунар. науч.-практической конф. 2016. Ч. 4. С. 96-99.

11. ВП-П8-2322 Комплексная программа развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года [Электронный ресурс]: утв. Правительством Рос. Федерации 24 апр. 2012 г. N 1853-п-П8. Доступ из справ.- правовой системы «Консультант Плюс».

12. Мохирев А.П., Аксенов Н.В., Керющенко А.А., Шеверев О.В. Критерии эффективности лесозаготовительных технолоий // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2015. № 43. С. 159-163.

13. Будник П.В. Совершенствование технологического процесса транспортировки лесосечных отходов и дров // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 6 (32). С. 7-10.

14. Плотникова Г.П. Совершенствование технологии производства древесностружечных плит на основе модифицированных связующих с использованием некондиционной древесины: дис. ... канд. техн. наук. Братск, 2011. 149 с.

15. 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.

16. Лесной кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]: федер. закон от 4 дек. 2006 г. N 200-ФЗ (ред. от 29.12.2017). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультатнПлюс».

17. Проект фонда по научному исследованию Номер проекта MYKZ 1606 [Элнктронный рескрс]. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс»

References

1. The forecast of long-term social and economic development of the Russian Federation until 2030 (razrabotan Minekonomrazvitiya Rossii) [Elnktronnyi reskrs] // Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tatnPlyus».

2. The concept of long-term social and economic development of the Russian Federation until 2020 [Elnktronnyi reskrs]: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 17 noyab. 2008 g. N 1662-r // Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tatnPlyus».

3. The strategy of social and economic development of Siberia till 2020 [Elnktronnyi reskrs]: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 5 iyulya 2010 g. №1120-r // Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tatnPlyus».

4. The "Complex Development of Lower Angara Region" project [Elnktronnyi reskrs]: proekt, utv. M-vom energetiki Ros. Federatsii 21 kt. 2008 g. // Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tatnPlyus».

5. Vetsheva V.F., Aksenovskaya N.A. The current state and the prospects of sustainable development of sawmilling in Siberia // The Bulletin of KrasGAU. 2012. № 3. P. 188-192.

6. Vetsheva V.F., Aksenovskaya N.A., Aizenberg A.I. Modern economic and social problems of development of timber processing complex of Siberia and way of their decision // Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry). 2007. № 6. P. 2-5.

7. Kozhukhova L.I., Bespalenko R.O. Sustainable development of forestry and allied industries - a basis of effective social and economic development of the region // Moscow state forest university bulletin - Forestry bulletin. 2006. № 4. P. 104-107.

8. Plotnikova G.P., Plotnikov N.P., Kuz'minykh E.A. Use of hydrolytic lignin in production of wood and polymeric composites // Systems Methods Technologies. 2013. № 4 (20). P. 133-138.

9. Antonov A.V., Frolovichev V.N. About the organization of controlling in a forest complex of Russia // Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences. 2013. № 7. P. 86-90.

10. Mokhirev A.P., Aksenov N.V. Diversification of a logging production // Rol' innovatsii v transformatsii sovremennoi nauki: sb. st. mezhdunar. nauch.-prakticheskoi konf. 2016. Ch. 4. P. 96-99.

11. VP-P8-2322 Comprehensive program of development of biotechnologies in the Russian Federation until 2020" [Elektronnyi resurs]: utv. Pravitel'stvom Ros. Federatsii 24 apr. 2012 g. N 1853-p-P8. Dostup iz sprav.- pravovoi sistemy «Konsul'tant Plyus».

12. Mokhirev A.P., Aksenov N.V., Keryushchenko A.A., Sheverev O.V. Criteria of efficiency of logging tekhnology // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. 2015. № 43. P. 159-163.

13. Budnik P.V. Improvement of technological process of transportation of felling waste and firewood // Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice. 2017. T. 5, № 6 (32). P. 7-10.

14. Plotnikova G.P. Improvement of the production technology of wood chipboards on the basis of modified binding with use of substandard wood: dis. ... kand. tekhn. nauk. Bratsk, 2011. 149 p.

15. 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.

16. The forest code of the Russian Federation [Elektronnyi resurs]: feder. zakon ot 4 dek. 2006 g. N 200-FZ (red. ot 29.12.2017). Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tatnPlyus».

17. Project of fund for scientific research Project number MYKZ 1606 [Elnktronnyi reskrs]. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tant Plyus».

УДК 669.713.728 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-136-141

О качестве алюминия-сырца для производства алюминиевой катанки

А.А. Терентьев[1 a], С.И. Ножко[2 b]

[1]Сибирский федеральный университет, ул. Киренского 26а, Красноярск, Россия
[2]ООО «РУСАЛ – Инженерно-технологический центр», ул. Пограничников 37, Красноярск, Россия
[a]AndreyTerentiev@rusal.com,[b]Semen.nozhko@rusal.com
[a]https://orcid.org/0000-0002-9229-0820, [b]https://orcid.org/0000-0001-7437-5145
Статья поступила 16.01.2018, принята 3.02.2018

В последние годы основным вектором развития алюминиевых заводов стало увеличение объемов производства продукции с добавленной стоимостью — сплавов и алюминиевой катанки. Для успешного производства алюминиевой катанки необходимо, чтобы содержание железа в электролитическом алюминии для обеспечения качественной расшихтовки было как минимум на 0,01 % ниже, чем требуется потребителям. При более существенном увеличении средневзвешенного содержания железа в алюминии-сырце в существующих технологических условиях, при неизменной номенклатуре товарной продукции, в литейном отделении начинается накопление металла средних и низших сортов по причине невозможности поддержания необходимого содержания железа в товарном металле, растет также риск необеспечения качества производимой продукции. Это экономически и технологически нецелесообразно. В статье представлены результаты регрессионного анализа, в рамках которого определена зависимость содержания железа в производимом алюминии-сырце от содержания серы в анодной массе. Проведен аналитический обзор экспериментов, направленных на снижение коррозии конструкций основного технологического оборудования, разработана методика планирования качества алюминия-сырца, даны практические рекомендации по ее использованию.

Ключевые слова: алюминиевая катанка; качество алюминия; содержание железа в алюминии; управление качеством; электролиз алюминия.

About the quality of raw aluminum for the production of aluminum wire rod

A.A. Terentiev[1 a], S.I. Nozhko[2 b]

[1]Siberian Federal University; 26, Academician Kirensky St., Krasnoyarsk, Russia
[2]"RUSAL - Engineering and Technology Center" Ltd; 37, Pogranichnikov St., Building #1, Krasnoyarsk, Russia
[a]AndreyTerentiev@rusal.com,[b]Semen.nozhko@rusal.com
[a]https://orcid.org/0000-0002-9229-0820, [b]https://orcid.org/0000-0001-7437-5145
Received 16.01.2018, accepted 3.02.2018

In recent years, the development of aluminum plants has been aimed at the increase in the volume of products with added value - alloys and aluminum rod. For the successful production of aluminum, it is necessary that the iron content of the electrolytic aluminum in order to ensure quality distribution is at least 0.01% lower than that required by consumers. With a more substantial increase in the average weighted iron content in raw aluminum under the existing technological conditions, with the same nomenclature of marketable products, in the foundry there is an accumulation of medium and lower grades of metal because of the impossibility of maintaining the necessary iron content in the commodity metal. Moreover, it is difficult to ensure the quality of products. It is economically and technologically impractical. The article presents the results of regression analysis, within the framework of which the dependence of the iron content in the produced raw aluminum on the sulfur content in the anode mass is determined. An analytical review of experiments aimed at reducing corrosion of the main technological equipment has been carried out. The technique for planning the quality of raw aluminum has been developed. Practical recommendations for its use have been given.

Key words: aluminum rod; quality of aluminum; content of iron in aluminum; quality control; electrolysis of aluminum.

Введение

Элементом, определяющим качество алюминия-сырца, является железо. Ранее содержание железа в электролитическом алюминии-сырце зависело от объема и своевременности капитального ремонта оборудования, и это положение в целом устраивало потребителя — литейно-прокатное отделение. Ситуация изменилась в 2005–2006 гг., когда увеличилось вовлечение высокосернистых коксов. Увеличение доли высокосернистых коксов серьезно повысило содержание железа в электролитическом алюминии, в первую очередь из-за коррозии секций газосборного колокола и токоподводящих анодных штырей [1–11].

В последние годы основным вектором развития алюминиевых заводов стало увеличение объемов производства продукции с добавленной стоимостью — сплавов и алюминиевой катанки [12, 13]. Для успешного производства алюминиевой катанки необходимо, чтобы содержание железа в электролитическом алюминии для обеспечения качественной расшихтовки было как минимум на 0,01 % ниже, чем требуется потребителям. При более существенном увеличении средневзвешенного содержания железа в алюминии-сырце в существующих технологических условиях, при неизменной номенклатуре товарной продукции, в литейном отделении начинается накопление металла средних и низших сортов по причине невозможности поддержания необходимого содержания железа в товарном металле. Растет также риск необеспечения качества производимой продукции, что экономически и технологически нецелесообразно.

Аналитический эксперимент. Сложившаяся ситуация стала причиной проведения аналитической работы по определению влияния параметров сырья для обеспечения необходимого качества производимой катанки [14–18]. Методом многофакторного регрессионного анализа была получена зависимость содержания железа в производимом сырце от содержания серы в анодной массе (на рисунке 1).

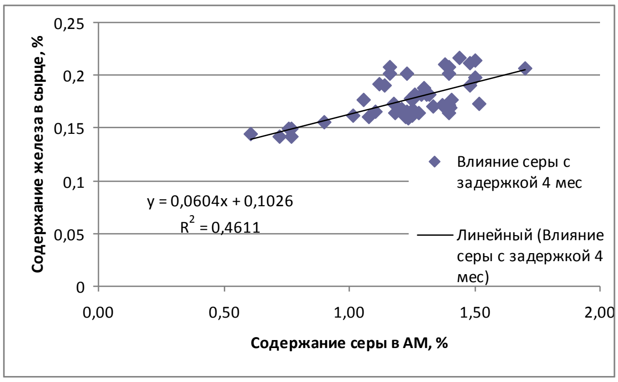


Рис. 1. Влияние содержания серы в анодной массе на содержание железа в сырце

Как видно на рисунке, содержание железа в сырце коррелирует с содержанием серы в анодной массе с 4-месячной задержкой после загрузки анодной массы в электролизеры. Это логично объясняется временным промежутком между загрузкой анодной массы в анод электролизера и ее выходом на подошву анода.

Также анализ производственных данных позволил вывести эмпирическую формулу зависимости количества электролизеров, выдающих металл высших сортов, от средневзвешенного содержания серы в анодной массе (1):

$$\begin{aligned} NBC = 100 * (N + (18\,040*(0{,}19 - \\ - 112/160 * CFe2O3\ Al2O3 * qAl2O3 - \\ - CFe\ AM * qAM - 0{,}1/P1 - 0{,}01 - \\ - 0{,}0604 * CSAM - 0{,}0506))) / Ncp, \end{aligned} \quad (1)$$

где NBC — количество электролизеров, производящих алюминий-сырец высших сортов, *%*; N — базовое количество электролизеров высших сортов, *шт.*; 18 040 — переводный коэффициент, показывающий влияние изменения прихода железа на количество электролизеров высших сортов, *шт./%Fe*; 0,19 — базовое содержание железа в электролизерах высших сортов, *%*; 112/160 — стехиометрический коэффициент перевода содержания оксида железа в глиноземе на содержание чистого железа; CFe2O3 Al2O3 — средневзвешенное содержание оксида железа в перерабатываемом глиноземе (включая сметки и вторичный глинозем), *%*; qAl2O3 — расход глинозема на производство алюминия, *т/т*; CFe AM — средневзвешенное физическое содержание железа в используемой анодной массе, *%*; qAM — расход анодной массы на производство алюминия, *т/т*; 0,1 — коэффициент, учитывающий влияние коррозии технологического инструмента на содержание железа в производимом алюминии-сырце; P1 — средняя периодичность технологических обработок электролизеров, *дней*; 0,01 — поправка на наличие систем АПГ, *%*; 0,0604 — коэффициент, учитывающий влияние содержания серы в анодной массе (коррозия секций ГСК и анодных штырей); CSAM — содержание серы в анодной массе, *%*; 0,0506 — поправка на оплавление фланцевого листа; Ncp — среднее количество работающих электролизеров.

Формула (1) свидетельствует, что увеличение содержания серы в анодной массе на 0,1 % приводит к увеличению содержания железа в электролитическом алюминии-сырце приблизительно на 0,006 %.

Обзор экспериментов, направленных на снижение влияния серы на коррозию анодных штырей. При изучении механизма коррозии штырей в самообжигающихся анодах было установлено, что продуктом коррозии является сульфид железа FeS, образующийся при взаимодействии железа с газообразным COS.

Для определения фактической скорости коррозии анодных штырей и недопущения критической геометрии анодного штыря на ПАО «РУСАЛ Братск» был организован мониторинг состояния парка анодных штырей. Состояние парка определялось ежеквартально путем взвешивания. Взвешивание как характеристика эксплуатационных свойств анодных штырей было выбрано как наиболее технологически простой и приемлемый вариант: прямое измерение геометрии анодного штыря — более сложный и трудоемкий процесс, предполагающий, к тому же, достаточно высокий уровень квалификации персонала. По результатам взвешивания была построена зависимость коррозии анодных штырей от содержания серы в анодной массе и сделан следующий вывод: увеличение содержания серы в анодной массе на 0,1 % увеличивает скорость коррозии на 0,2 кг/мес.

Для подтверждения статистически выявленной зависимости влияния содержания серы на скорость коррозии анодных штырей был проведен лабораторный опыт, заключавшийся в запекании стального стержня в анодной массе с последующей выдержкой при температуре 800 °C в течение 3-х суток [19].

Исследование коррозии стального образца металла в лабораторных условиях проводилось в фарфоровых огнеупорных тиглях. Образцы испытуемого материала предварительно очищали от оксидных пленок. Затем образцы обезжиривались ацетоном и взвешивались на аналитических весах типа АДВ-200 (класс точности измерений массы образцов — 0,2). Подготовленный таким способом образец помещали в тигель и засыпали сверху промышленной анодной массой производства «РУСАЛ Братск». После этого тигли с образцами загружали в печь. Для предотвращения выгорания угольной составляющей анодная масса присыпалась глиноземом (Al2O3). По окончании эксперимента тигли охлаждали в эксикаторе, и по достижении комнатной температуры образцы повторно взвешивали. Фактическая коррозия оценивалась по потере массы исследуемого стального стержня.

Корректность условий проведения опыта оценивалась при сравнении фазового состава окалины, взятой с промышленного анодного штыря, и окалины стального стержня, взятой после проведения опыта. Сопоставимый фазовый состав промышленной (с промышленного анодного штыря) и лабораторной (со стального стержня) окалины показывает правильность разработанной методики (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение фазового состава (распределения серы) промышленной и лабораторной окалины [19]

Окалина	Определяемые компоненты, %		
	S общая	S сульфатная	S сульфидная
С анодного штыря	15,8	0,2	15,6
Лабораторная	16,6	0,4	16,2

Для снижения коррозии стальных штырей проводилось много исследований. Условно их можно разделить на несколько направлений [20, 21]:

– снижение коррозии анодных штырей посредством использования высоколегированных сталей либо коррозионно-устойчивых покрытий, изменение геометрии анодных штырей;

– снижение коррозии анодных штырей путем изменения рецептуры приготовления подштыревой анодной массы;

– прямое снижение содержания серы в используемом коксе.

В разные годы компаниями Alcoa, Kaiser Aluminium, Martin Marietta Aluminium, Comalco и департаментом энергетики правительства США проводились исследования, предусматривающие оценку целесообразности использования различных типов сталей, сплавов и полимерных покрытий в целях снижения коррозии. По результатам исследований было выявлено, что анодные штыри из нержавеющей стали наиболее подвержены коррозии вследствие реакции между фтором и хромом, который входит в состав сплавов нержавеющей стали.

Ни один из испытанных видов стали не обеспечил существенное увеличение срока службы анодных штырей по сравнению с широко используемой для их изготовления сталью 3 при значительном росте стоимости. Нанесение защитных покрытий на поверхность анодного штыря также технологически себя не оправдало — ни один из типов полимерных покрытий не выдержал испытаний при температурах, в которых эксплуатируется анод. Работы по оптимизации геометрии привели к положительным результатам в части снижения перепада напряжения в аноде, однако также не позволили качественно изменить срок службы анодных штырей [19].

Исследования с целью оптимизации рецептуры изготовления подштыревой анодной массы производились в 1980-е гг. при поддержке правительства США в лаборатории аэрокосмических материалов в Балтиморе (США, штат Мериленд) и в национальной исследовательской лаборатории в Окридже (США, штат Теннеси). В рамках исследований были получены положительные результаты (существенное увеличение срока службы анодных штырей) при добавлении в подштыревую анодную массу в качестве протектора алюминиевой стружки. Однако данный результат не был тиражирован ввиду экономической нецелесообразности. Изготовление подштыревой анодной массы из низкосернистого кокса также не показало качественного изменения скорости коррозии анодных штырей. Исследователи связывали данный факт с увеличением проницаемости газов в результате более высокой пористости исследуемого малосернистого кокса [19].

Аналитический обзор экспериментов, направленных на снижение влияния серы на коррозию секций газосборного колокола. Как было указано выше, увеличение прихода железа в сырец при росте содержания серы в анодной массе связано с интенсификацией коррозионных процессов анодных штырей и секций газосборного колокола. Следует рассмотреть научные работы, связанные со снижением скорости коррозии секций газосборного колокола (ГСК).

Изначально коррозия секций ГСК происходит несколько по-иному, нежели коррозия анодных штырей (табл. 2).

Таблица 2

Сопоставление химического состава окалин [22]

Окалина	Определяемые компоненты, %			
	F общий	S общая	S сульфатная	S сульфидная
Анодного штыря	–	15,8	0,2	15,6
Секций ГСК	20,6	14,0	14,0	–
Дымовых труб	3,5	8,7	8,7	–

Настолько различный состав промышленных окалин объясняется условиями их образования. Так, окалина анодного штыря образуется в восстановительной атмосфере в присутствии большого избытка углерода анода. Окалина секций ГСК и дымовых труб, напротив, образуется в условиях окислительной атмосферы, в присут ствии достаточно большого количества газообразного фтора. Соответственно, повышение коррозионной стойкости секций ГСК, дымовых труб в сравнении с анодными штырями требует иного подхода [23].

Сопоставление микроскопирования и химического микроанализа свидетельствует, что натрий и фторсодержащие продукты в реакционной зоне отсутствуют, а их соединения не играют никакой роли в процессе коррозии. Одно из наиболее важных наблюдений заключается в том, что в реакционной зоне присутствует сера. Зона, обогащенная серой, имеет толщину около 100–150 мкм, в то время как общая толщина чешуйчатого слоя около 2 мм. Рентгеновские исследования также показывают, что в зоне коррозии присутствуют преимущественно соединения железа и серы. Это означает, что первичная реакция коррозии дает в качестве основного продукта FeS. Сера для образования FeS доставляется через SO2 путем диффузии газа к зоне коррозии через поры в слоях оксидов железа. SO2 является продуктом окисления серы в ходе анодного процесса. Когда SO2 вступает в контакт с оксидами железа, например, с Fe2O3, в период, когда температура ниппеля 325 °C и ниже, он адсорбируется окалиной в присутствии O2:

$$Fe2O3 + 3SO2 + 3/2\ O2 = Fe2(SO4)3. \qquad (2)$$

Парциальное давление PSO2 соли Fe2(SO4)3 ниже 10–10 Па при 200 °C, поэтому Fe2O3 является хорошим сорбентом для SO2 при низких температурах. Даже следы SO2, образующиеся в электролизере, активно сорбируются оксидами железа в присутствии кислорода и соответствующим образом накапливаются. Когда температура поверхности секций достигает 430 °C и более, реакция, указанная выше, начинает протекать в обратном направлении. Поэтому накопленная соль Fe2(SO4)3 будет разрушаться с образованием Fe2O3, O2 и SO2. Образовавшиеся газы O2 и SO2 будут диффундировать в зону реакции, где парциальное давление кислорода и оксида серы низкое.

В узком слое реакционной зоны кислород и оксид серы вступают в реакцию с железом секций газосборного колокола и пояска анодного кожуха по схеме:

Fe + 1/2 O2 = FeO;

Fe + SO2 = FeS + O2;

Fe + 2SO2 = FeS2 + 2O2.

При этом FeO является неустойчивым соединением и переходит в Fe2O3, дополняя поверхность новыми чешуйками окалины. Сульфиды железа также быстро окисляются до оксидов и переходят в окалину.

Концентрация диоксида серы в удаляемых от электролизеров с самообжигающимся анодом газах колеблется в пределах 100–300 мг/нм^3.

Обследование группы электролизеров показало, что при нормальной работе температура секций газосборного колокола не превышает 500 °C, причем на крайних и торцевых секциях температура несколько ниже, в то время как средние секции подвергаются действию более высоких температур. При прямом контакте секций газосборного колокола с расплавом их температура резко возрастает и достигает 800 °C [24; 25].

Высокая температура вызывает изменение структуры чугуна: феррито-перлитная структура (при литье «в землю») или ледебуритная эвтектика (при литье в кокиль) распадаются, и образуется ферритная структура с пластинчатым графитом. Изменение структуры сопровождается ростом содержания чугуна, изменением его механических свойств и создает благоприятные условия для развития коррозионного процесса в объеме чугуна вдоль графитовых включений. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что быстрый выход из строя газосборных колоколов обусловлен резким снижением механической прочности серого чугуна в результате:

– коррозии в среде анодных газов, распространяющейся вдоль графитовых включений по всему объему чугуна;

– структурных изменений серого чугуна при изменении температурного режима эксплуатации секций;

– коррозии под действием криолито-глиноземного расплава.

Оценка коррозионной стойкости различных чугунов в криолит-глиноземном расплаве проводилась многими исследователями. Исследования в рамках данной работы в целом подтвердили полученные ранее результаты. Их анализ показывает, что лучшей стойкостью в атмосфере отходящих электролизных газов обладает хромистый чугун, содержащий 20–30 % хрома. Скорость коррозии такого чугуна в 5–6 раз меньше, чем у серого чугуна. Низкохромистые чугуны имеют практически такую же коррозионную стойкость, как и серый чугун.

Образцы высокопрочного чугуна оказались несколько более устойчивы по сравнению с серым чугуном, что вполне закономерно и хорошо согласуется с теоретическими представлениями о процессах окисления серых и высокопрочных чугунов. Наличие графита в виде разобщенных сфероидных включений препятствует проникновению окислительного агента вглубь матрицы, и окисление в таком чугуне идет практически только с поверхности, в то время как в сером чугуне, имеющем рассеченную пластинчатым графитом матрицу, процесс окисления захватывает не только поверхность, но и внутреннюю (по графитовым включениям) часть образца.

Ускоренное охлаждение с целью получения перлитной матрицы в высокопрочном чугуне практически не сказывается на стойкости образцов в анодных газах, так как при данных температурах уже после 40 суток испытания структура металлической основы была чисто ферритной [26].

Нестойкими в агрессивной среде анодных газов оказались алюминиевые чугуны, причем менее стойким оказался чугун, содержащий большее количество алюминия. Это, по-видимому, связано с наличием фтора в атмосфере анодных газов, с которыми алюминий может давать соединения.

На высокохромистых чугунах окисел имеет плотноупакованную решетку типа Me3O4. На алюминиевом чугуне продукты коррозии содержат окислы железа и алюминия.

Металлографический анализ образцов чугуна в исходном состоянии и после испытания в газах электролизера показал, что наиболее значительные структурные изменения произошли в сером и высокопрочном перлитном чугуне.

Чугуны, легированные хромом, обладают более стабильной структурой. В отличие от серого и отбеленного нелегированных чугунов, в низкохромистых чугунах не обнаружено разложение вторичного и первичного цементита. Структуры высокохромистых (20–30 % хрома) чугунов также весьма стабильны. Проникающего внутрь окисления на образцах чугунов, легированных хромом, не обнаружено.

Испытания механических свойств материалов показали, что при температурах 500–700 °С большую кратковременную прочность имеют высокохромистые чугуны и чугуны с шаровидным графитом. За исключением последнего, остальные испытанные материалы при температуре 500 °С имеют примерно одинаковые пластические свойства. У высокопрочного чугуна эти характеристики в несколько раз выше [26].

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

– небольшие добавки хрома, никеля и кремния не могут оказывать существенного влияния на коррозионную стойкость железоуглеродистых сплавов в криолитоглиноземном расплаве;

– добавки алюминия, даже в значительном количестве (до 22 %), также практически не могут влиять на коррозионную стойкость сплавов в исследуемой среде;

– введение в сплав хрома в пределах 20–30 % резко увеличивает его коррозионную стойкость;

– наиболее оптимальным материалом для изготовления секций газосборного колокола следует считать чугуны марок ЖЧХ-30, ВЧ-50, ЖЧХ-1,5.

Проведенные в рамках данной работы экспериментальные испытания секций ГСК, изготовленных из указанных материалов, подтвердили ранее изложенные выводы, а потому углубление исследований было признано нецелесообразным.

Выводы

1. Методом регрессионного анализа данных определена зависимость содержания железа в производимом алюминии-сырце от содержания серы в анодной массе.
2. Проведен аналитический обзор экспериментов, направленных на снижение коррозии анодных штырей и секций газосборного колокола. Показано, что процесс коррозии анодных штырей и секций газосборного колокола изучен достаточно глубоко и потому не нуждается в дополнительном изучении.
3. Организован мониторинг коррозионной убыли веса штыря. Определена фактическая скорость сгорания анодных штырей и ее взаимосвязь с содержанием серы в анодной массе.
4. Определена критическая величина содержания серы в анодной массе, разработана методика планирования качества производимого алюминия-сырца, даны практические рекомендации по ее использованию.

Литература

1. Gomes A.S., Heilgendorff R.M. Carbon Plant Perfomance with Blended Coke // Light Metals. 2005. P. 659-663.
2. Edwards L.S., Neyrey K.J., Lossius L.P. A Rewiew of Coke and Anode Desulfurization // Light Metals. 2007. P. 895-900.
3. Adams A., Cahill R., Belzile Y., Cantin K., Gendron M. Minimizing Impact of Low Sulfur Coke on Anode Quality// Light Metals. 2009. P. 957-962.
4. Gendron M., Whelan S., Cantin K. Coke Blending and Fines Circuit Targeting at the Alcoa Deschambault Smelter // Light Metals. 2008. P. 861–864.
5. Vogt F., Tonti R., Edwards L.C. Global Trends in Anode Grade Coke Availability & Quality for Australasian Aluminium Industry. Proc. 7-th Aust. Al Smelting Workshop. 2001.
6. Abbas H., Khaji K., Sulaman D. Desulphurization Control During Anode Baking, its Impact on Anode Perfomance and Operational Costs-Alba´s Experience // Light Metals. 2010. P. 1011–1014.
7. Sorlie M., Kuang Z., Thonstad J. Effect of Sulfur on Anode Reactivity and Electrolytic Consumption // Light Metals. 1994. P. 659-665.
8. Grandfield J.F., Taylor J.A. The Downstream Consequences of Rising Ni and V Con-centrations in Smelter Grade Metal and Potential Control Strategies // Light Metals. 2009. P. 1007–1011.
9. Половников В.М., Черских И.В., Старцев Е.А. Опыт использования высокосернистых коксов при производстве обожженных анодов // Материалы Второго междунар. конгресса «Цветные металлы-2010». М., 2010. С. 45-49.
10. Косыгин В.К., Богданов Ю.В., Аюшин Б.И., Ершов В.А., Сысоев И.А. Технология анода с применением «сухой» анодной массы на пековом коксе: опытно-промышленные испытания на Иркутском алюминиевом заводе // Электрометаллургия легких металлов: сб. науч. тр., посвящ. 45-летию ОАО "Сибвами". М., 2004. С. 32–37.
11. Янко Э.А. Аноды алюминиевых электролизеров. М.: ИД. «Руда и металлы», 2001.
12.Справочник металлурга. Производство алюминия и сплавов на его основе /авт.- сост. Б.И. Зельберг, Л.В. Рагозин, А.Г. Баранцев, О.И. Ясевич, В.Г. Григорьев, А.Н. Баранов. СПб.: МАНЭБ, 2013. 676 с.
13. Кузьмин М.П. Исследование и совершенствование процесса кристаллизационного рафинирования технического алюминия: автореф. дис . … канд. техн. наук. Иркутск, 2015.
14. Ножко С.И. К вопросу управления качеством производимого электролитического алюминия // Цветные металлы. 2011. № 6. С. 45–47.
15. Бегунов А.И., Кузьмин М.П. Способ очистки технического алюминия: пат. 2593881. Рос. Федерации; заявл. 08.04.15, опубл. 10.08.16.
16. Бегунов А.И., Кузьмин М.П. Повышение сортности технического алюминия методом фракционной кристаллизации // Актуальные проблемы химии и биотехнологии: материалы I всерос. науч.-практической конф. Иркутск, 2015. С. 9-11.
17. Кузьмин М.П., Кузьмина М.Ю. Ликвация и повышение качества проб литейных алюминиевых сплавов // Вестн. ИрГТУ. 2013. № 12 (83). С. 210-213.
18.Begunov A.I., Kuzmin M.P. Thermodynamic stability of intermetallic compounds in technical aluminium // Журн. Сиб. Федер. ун-та. Сер. Техника и технологии. 2014. Т. 7, № 2. С. 132-137.
19. Победаш А.С. Повышение эффективности производства алюминия путем увеличения срока службы анодных штырей: дис. … канд. техн. наук. Иркутск, 2009.
20. Бажин В.Ю., Кульчицкий А.А., Кадров Д.Н., Петров П.А. Оптический контроль состояния стальных анодных штырей на электролизерах Содерберга // Металлург. 2016. № 8. С. 12-15.
21. Ножко С.И., Ворона А.Б., Турусов С.Н., Янко Э.А. Повышение эффективности работы алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом и верхним токоподводом посредством дифференцированной расстановки анодных штырей // Цветные металлы. 2010. № 3. С. 62-64.

22. Тимкина Е.В. Исследование и разработка технологии получения фтористых солей из фторуглеродсодержащих материалов при производстве алюминия: автореф. дис. … канд. техн. наук. Иркутск, 2016.

23. Гуляев А.В., Гавриленко Л.В., Баранов А.Н., Ножко С.И. Утилизация твердых углеродсодержащих отходов на алюминиевом заводе, оснащенном электролизерами с самообжигающимися анодами с верхним токоподводом// Экология и промышленность России. 2017. № 5. С. 8-10.

24. Ножко С.И. Способ определения производительности электролизера для производства алюминия // Изв. высш. учеб. заведений. Цветная металлургия. 2011. № 1. С. 18-21.

25. Баранов А.Н., Гавриленко А.А., Волянский В.В., Гавриленко Л.В., Ножко С.И., Тимкина Е.В. Технология получения фторида кальция из отходов алюминиевого производства // Металлург. 2017. № 6. С. 69-73.

26. Справочник по чугунному литью / авт.-сост. Н.Г. Гришковец. М.: Металлургия, 1978.

References

1. Gomes A.S., Heilgendorff R.M. Carbon Plant Perfomance with Blended Coke // Light Metals. 2005. P. 659-663.

2. Edwards L.S., Neyrey K.J., Lossius L.P. A Rewiew of Coke and Anode Desulfurization // Light Metals. 2007. P. 895-900.

3. Adams A., Cahill R., Belzile Y., Cantin K., Gendron M. Minimizing Impact of Low Sulfur Coke on Anode Quality // Light Metals. 2009. P. 957-962.

4. Gendron M., Whelan S., Cantin K. Coke Blending and Fines Circuit Targeting at the Alcoa Deschambault Smelter // Light Metals. 2008. P. 861-864.

5. Vogt F., Tonti R., Edwards L.C. Global Trends in Anode Grade Coke Availability & Quality for Australasian Aluminium Industry. Proc. 7-th Aust. Al Smelting Workshop. 2001.

6. Abbas H., Khaji K., Sulaman D. Desulphurization Control During Anode Baking, its Impact on Anode Perfomance and Operational Costs-Alba´s Experience // Light Metals. 2010. P. 1011-1014.

7. Sorlie M., Kuang Z., Thonstad J. Effect of Sulfur on Anode Reactivity and Electrolytic Consumption // Light Metals. 1994. P. 659-665.

8. Grandfield J.F., Taylor J.A. The Downstream Consequences of Rising Ni and V Concentrations in Smelter Grade Metal and Potential Control Strategies // Light Metals. 2009. P. 1007-1011.

9. Polovnikov V.M., Cherskikh I.V., Startsev E.A. Experience in the use of high-sulfur cokes in the production of baked anodes // Materialy Vtorogo mezhdunar. kongressa «Tsvetnye metally-2010». M., 2010. P. 45-49.

10. Kosygin V.K., Bogdanov Yu.V., Ayushin B.I., Ershov V.A., Sysoev I.A. Anode technology using "dry" anode mass on pitch coke: pilot-industrial tests at the Irkutsk Aluminum Plant // Elektrometallurgiya legkikh metallov: sb. nauch. tr., posvyashch. 45-letiyu OAO "Sibvami". M., 2004. P. 32-37.

11. Yanko E.A. Anodes of aluminum electrolyzers. M.: ID. «Ruda i metally», 2001.

12. Reference Book of Metallurgist. Production of aluminium and alloys based on it /avt.-sost. B.I. Zel'berg, L.V. Ragozin, A.G. Barantsev, O.I. Yasevich, V.G. Grigor'ev, A.N. Baranov. SPb.: MANEB, 2013. 676 p.

13. Kuz'min M.P. Research and Improvement of the Process of Crystallization Refining of Technical Aluminium: avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk. Irkutsk, 2015.

14. Nozhko S.I. Quality management of electrolytic aluminum // Non-ferrous Metals. 2011. № 6. P. 45-47.

15. Begunov A.I., Kuz'min M.P. Method of Cleaning technical Aluminium: pat. 2593881. Ros. Federatsii; zayavl. 08.04.15, opubl. 10.08.16.

16. Begunov A.I., Kuz'min M.P. Improvement of the Quality of technical Aluminium by fractional Crystallization // Aktual'nye problemy khimii i biotekhnologii: materialy I vseros. nauch.-prakticheskoi konf. Irkutsk, 2015. P. 9-11.

17. Kuz'min M.P., Kuz'mina M.Yu. Segregation and Quality improvement of Samples of foundry Aluminium Alloys // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2013. № 12 (83). P. 210-213.

18. Begunov A.I., Kuzmin M.P. Thermodynamic stability of intermetallic compounds in technical aluminium // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2014. T. 7, № 2. P. 132-137.

19. Pobedash A.S. Increase the Efficiency of Aluminium Production by Increasing the Service Life of the Anode Pins: dis. … kand. tekhn. nauk. Irkutsk, 2009.

20. Bazhin V.Yu., Kul'chitskii A.A., Kadrov D.N., Petrov P.A. Optical Control of the State of Steel Anode Pins on Soderberg Electrolyzers // Metallurg. 2016. № 8. P. 12-15.

21. Nozhko S.I., Vorona A.B., Turusov S.N., Yanko E.A. Increasing the Efficiency of the Aluminium Cell by Differentiating the Anode Pin Arrangement // Non-ferrous Metals. 2010. № 3. P. 62-64.

22. Timkina E.V. Research and Development of Technology for the Production of Fluoride Salts from Fluorocarbon-containing Materials in the Production of Aluminium: avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk. Irkutsk, 2016.

23. Gulyaev A.V., Gavrilenko L.V., Baranov A.N., Nozhko S.I. Utilization of Solid carbonaceous Waste at an Aluminium Plant // Ekologia i promyshlennost Rossii (Ecology and Industry of Russia). 2017. № 5. P. 8-10.

24. Nozhko S.I. Method for determining the productivity of an electrolytic cell for the production of aluminum // Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities′ Proceedings. Non-ferrous Metallurgy). 2011. № 1. P. 18-21.

25. Baranov A.N., Gavrilenko A.A., Volyanskii V.V., Gavrilenko L.V., Nozhko S.I., Timkina E.V. Technology for Obtaining Calcium Fluoride from Aluminium Waste // Metallurg. 2017. № 6. P. 69-73.

26. Guide to Iron Casting / avt.-sost. N.G. Grishkovets. M.: Metallurgiya, 1978.

УДК 006.91, 681 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-142-147

К построению и реализации оптимальных планов проведения поверок средств измерений с помощью рабочих эталонов

Р.З. Хайруллин[a], К.А. Цыбульникова[b]

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе 26, Москва, Россия
[a]zrk@nm.ru, [b]k.tsybulnikova@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-1214-5069, [b]https://orcid.org/0000-0002-1151-9946
Статья поступила 25.12.2017, принята 30.01.2018

Предлагается научно-методический подход к построению и реализации оптимальных планов проведения поверок образцовых средств измерений, используемых для комплектации технических систем специального назначения. Основу подхода составляют математическая модель метрологического обслуживания средств измерений в процессе эксплуатации, а также методы построения оптимального плана поверок и последовательности проведения поверок средств измерений. Математическая модель метрологического обслуживания представляется в форме стандартной целочисленной задачи линейного программирования с ограничениями в форме равенств и неравенств. При этом средства измерений объединяются в комплексы по территориальному принципу. С использованием принципа декомпозиции указанная задача представляется в виде совокупности нескольких задач линейного программирования меньшей размерности, количество которых равно количеству комплексов. В работе сформулированы достаточные условия целочисленности оптимального решения задачи линейного программирования. При выполнении этих условий рекомендуется использовать стандартный симплекс-метод, имеющий существенно меньшую трудоемкость по сравнению с методами решения целочисленных задач. После решения совокупности задач линейного программирования строится оценка снизу для затраченного ресурса (времени обслуживания всех комплексов систем управления). После построения оптимального плана строится последовательность применения рабочих эталонов для поверок комплексов средств измерений и производится оценка времени нахождения на обслуживании хотя бы одного средства измерений. В течение этого времени техническая система в целом, в состав которой входят поверяемые средства измерений, становится неработоспособной и не может быть использована по прямому назначению. При построении последовательности применения рабочих эталонов для поверок средств измерений используются стандартные алгоритмы и программные средства решения комбинаторных задач и дискретных задач оптимизации. Представлены результаты решения модельной задачи построения оптимальных планов проведения поверок.

Ключевые слова: планирование поверок средств измерений; задача линейного программирования; рабочие эталоны.

To the construction and implementation of optimal plans for verification of measuring instruments with the help of working standards

R.Z. Khayrullin[a], K.A. Tsybulnikova[b]

Moscow State University of Civil Engineering; 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia
[a]zrk@nm.ru, [b]k.tsybulnikova@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-1214-5069, [b]https://orcid.org/0000-0002-1151-9946
Received 25.12.2017, accepted 30.01.2018

A scientific-methodical approach is proposed for the construction and implementation of optimal plans for conducting tests of exemplary measuring instruments used to complete technical systems for special purposes. The basis of the approach is a mathematical model of metrological maintenance of measuring instruments in the process of exploitation, a method for constructing an optimal plan of checks and a method for constructing a sequence of inspections of measuring instruments. The mathematical model of metrological service is represented in the form of a standard integer linear programming problem with constraints in the form of equalities and inequalities. In this case, the means of measurement are combined into complexes of measuring instruments on a territorial basis. Using the decomposition principle, the indicated problem is represented as a set of several linear programming problems of smaller dimension. The number of linear programming tasks is equal to the number of complexes. In this paper, sufficient conditions for the integer-valuedness of the optimal solution of the linear programming problem are formulated. When these sufficient conditions are met, it is recommended to use the standard simplex method, which is significantly less labor-intensive in comparison with methods for solving integer-valued problems. After solving the totality of linear programming problems, a lower estimate for the expended resource (service time of all control system complexes) is constructed. After the construction of the optimal plan, a sequence of application of working standards for verification of the complexes of measuring instruments is built, and the time of finding at least one measuring instrument *is evaluated. During this time, the technical system as a whole, which includes the verified means of measurement, becomes inoperative and can not be used for its intended purpose. To build a sequence of application of working standards for verification of measuring instruments, standard algorithms and software solutions for combinatorial problems and discrete optimization problems are used. The results of solving the model problem of constructing optimal verification plans are presented.*

Key words: planning of verification of measuring instruments; linear programming problem; work measurement standards.

Введение

Обеспечение корректности передачи раз мера единиц физических величин во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством поверочных схем — нормативных документов, устанавливающих соподчинение средств измерений (СИ), участвующих в передаче размера единицы от эталонов к эталонам, и СИ с указанием методов и погрешности [1–8]. Под передачей единицы физической величины другим эталонам и СИ понимается приведение размера величины, хранимой в СИ, к размеру единицы величины, воспроизводимой эталоном. Эта процедура осуществляется при поверке СИ. При поверках, проводимых на регулярной основе на этапе эксплуатации специальной техники и установленных на них СИ, происходит процесс передачи размера единиц от эталонов более высокого разряда к эталонам низшего разряда и СИ.

В общем виде поверочную схему можно представить в виде пирамиды (рис. 1), в основании которой находится вся совокупность средств измерений одной и той же физической величины, вершину занимает исходный эталон (государственный эталон), а на промежуточных «этажах» расположены рабочие эталоны (РЭ) различных разрядов в соответствии с их точностью [1–3]. Различные аспекты применения измерительной техники и методы, используемые для повышения точности измерений, рассмотрены в [4–10].

Рис. 1. Поверочная схема

В статье предлагается научно-методический подход к построению и реализации оптимальных планов проведения поверок образцовых СИ [12, 13], расположенных в пирамиде между РЭ и рабочими средствами измерений, с помощью РЭ, включающий:

– метод построения оптимального плана поверок (метрологического обслуживания) образцовых СИ и комплексов средств измерений (КСИ),

– метод построения последовательности проведения поверок КСИ.

В качестве критерия оптимальности используется расход ресурса на проведение поверок.

Задача построения оптимального плана поверок формулируется в форме целочисленной задачи линейного программирования (ЗЛП). При этом СИ объединяются в КСИ по территориальному принципу. С использованием принципа декомпозиции задача представляется в виде совокупности нескольких ЗЛП меньшей размерности. Количество ЗЛП равно количеству КСИ. В работе сформулированы достаточные условия целочисленности оптимального решения ЗЛП. При выполнении этих условий для решения ЗЛП предлагается использовать стандартный симплекс-метод. После решения совокупности ЗЛП строится оценка снизу для времени обслуживания всех КСИ.

После построения оптимального плана формируется последовательность применения РЭ для поверок КСИ и производится оценка времени нахождения на обслуживании хотя бы одного СИ. В течение этого времени техническая система в целом, в состав которой входят поверяемые СИ, является неработоспособной и не может быть использована по прямому назначению. Для построения последовательности применения РЭ для поверок СИ используются стандартные алгоритмы и программные средства решения комбинаторных и дискретных задач оптимизации [14–20].

Постановка задачи оптимального использования рабочих эталонов для поверок средств измерений. Рассмотрим R рабочих эталонов, используемых для передачи M различных единиц величин.

Характеристический вектор для r-го РЭ размерности M имеет вид:

$$V_r^0 = \begin{pmatrix} v_{r1}^* \\ v_{r2}^* \\ \dots \\ v_{rM}^* \end{pmatrix}, \ r = 1,2,...,R \ .$$

Координаты характеристического вектора могут равняться нулю или единице. Координаты показывают, какие физические величины могут быть переданы СИ с помощью этого эталона. Например:

$$V_r^0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Пусть задано некоторое множество СИ, описываемое с помощью множества характеристических векторов. Объединим все СИ в J комплексов СИ, например, по территориальному принципу. Если сложить все характеристические векторы, входящие в КСИ, то получим вектор поверяемых величин для данного КСИ:

$$S_j^* = \begin{pmatrix} s_{j1}^* \\ s_{j2}^* \\ \dots \\ s_{jM}^* \end{pmatrix}, \ j = 1,2,..., J .$$

Этот вектор, имеющий целочисленные неотрицательные координаты, показывает, какие физические величины и в каком количестве должны быть переданы в процессе обслуживания данного КСИ.

Матрица поверяемых величин имеет вид:

$$S_j^* = \begin{pmatrix} s_{j1}^* & s_{21}^* & \dots & s_{J1}^* \\ s_{12}^* & s_{22}^* & \dots & s_{J2}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{1M}^* & s_{2M}^* & \dots & s_{JM}^* \end{pmatrix}.$$

Предполагается, что для передачи эталоном с номером r единицы величины с номером j используется некоторый ресурс t_{rj} (в настоящей работе в качестве ресурса выбрана продолжительность поверки). Тогда матрица удельных затрат ресурсов имеет вид:

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1J} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{R1} & t_{R2} & \dots & t_{RJ} \end{pmatrix}.$$

Введем неизвестные величины: x_{rj} — количество единиц физических величин с порядковым номером j, передаваемых r-м эталоном. Тогда искомая матрица обслуживания имеет вид:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1J} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{R1} & x_{R2} & \dots & x_{RJ} \end{pmatrix}.$$

Сформулируем задачу оптимального распределения РЭ по множеству КСИ в форме целочисленной ЗЛП.

Требуется так распределить РЭ по КСИ (или наоборот КСИ по РЭ), чтобы некоторый линейный критерий качества, зависящий от распределения РЭ по КСИ и ресурса, принимал наименьшее значение:

$$L(X,T) = \sum_{j=1}^{J} x_{rj} t_{rj} \to \min \qquad (1)$$

при условии гарантированного проведения всех необходимых поверок СИ:

$$\sum_{r=1}^{R} x_{rm} v_{rj}^* \ge s_{jm}^*,$$

$$m = 1,2,..., M, \ j = 1,2,..., J . \qquad (2)$$

После решения (1), (2) и нахождения матрицы X строится технологическая матрица TEX путем поэлементного перемножения элементов матриц T и X:

$$TEX = T \otimes X .$$

Технологическая матрица показывает количество ресурсов, израсходованных на каждую операцию (передачу r-м эталоном j-й физической величины в количестве x_{rj} раз).

Затем проводится оценка суммарного ресурса, израсходованного r-м РЭ (сумма элементов r-й строки матрицы). Отметим, что если в качестве ресурса выбрать время обслуживания, то в течение этого времени РЭ уже занят обслуживанием и не может быть использован для передачи единиц величин другим КСИ.

Производится расчет ресурса, затраченного на поверку j-го КСИ (сумма элементов j-го столбца матрицы).

Отметим, что при решении ряда практических задач система ограничений (2) может быть представлена в виде симплекс-формы с единичными коэффициентами при неизвестных. В этом случае решение соответствующей ЗЛП будет целочисленным. Указанное обстоятельство позволяет применять для решения целочисленной ЗЛП стандартный симплекс-метод, который имеет существенно меньшую трудоемкость по сравнению с общими методами решения целочисленной ЗЛП [14, 20].

Отметим также, что задача построения последовательности использования РЭ для поверок СИ является NP — полной (труднорешаемой) задачей [14, 20]. Для решения этой задачи в настоящее время существуют достаточно эффективные приближенные методы и программные средства, описанные, например, в [21, 22].

Результаты апробации. Реальный парк СИ включает сотни тысяч образцов СИ, десятки КСИ и десятки тысяч РЭ. ЗЛП такой размерности и соответствующие задачи построения последовательностей проведения поверок решаются с помощью [14, 22]. В статье для наглядности приведены результаты решения модельной задачи: $R = 4$, $M = 4$, $J = 3$. Характеристические векторы для РЭ:

$$V_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \ V_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \ V_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \ V_4 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

характеристические векторы поверяемых величин для СИ, входящих в первый КСИ:

$$S_{11} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \ S_{12} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \ S_{13} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \ S_{14} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

для СИ, входящих во второй КСИ:

$$S_{21} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix},\ S_{22} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},\ S_{23} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

для СИ, входящих в третий КСИ:

$$S_{31} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix},\ S_{32} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},\ S_{33} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$S_{34} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix},\ S_{35} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix},\ S_{36} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Тогда вычисленные векторы поверяемых величин для трех КСИ:

$$S_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix},\ S_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix},\ S_3 = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 4 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

Векторы S_1, S_2, S_3 представим в виде матрицы поверяемых величин:

$$S = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 3 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 4 \\ 0 & 3 & 2 \end{pmatrix}.$$

Матрица удельных затрат и матрица затрат ресурсов (времени) на поверку имеют вид:

$$T = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 1 \\ 4 & 3 & 4 \end{pmatrix},\quad Z = T \otimes S = \begin{pmatrix} 6 & 0 & 3 \\ 6 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 4 \\ 0 & 9 & 8 \end{pmatrix}.$$

Введем неизвестные величины: x_{rj} — количество физических величин с порядковым номером j, передаваемых r-м эталоном. Тогда искомая матрица обслуживания имеет размерность 4 х 3.

Решение задачи об оптимальном проведении поверок СИ с помощью РЭ состоит их трех этапов:

1. Решается задача о минимуме суммарного времени поверок всех КСИ при условии, что РЭ в каждый момент времени может обслуживать только одно КСИ (одновременное обслуживание нескольких КСИ невозможно).

2. Строится оценка снизу для времени обслуживания всех СИ.

3. Строится последовательность проведения поверок СИ для каждого рабочего эталона. Рассчитывается время обслуживания трех КСИ в целом (минимально возможное время, в течение которого хотя бы одно СИ находится на обслуживании).

Требуется найти минимум суммарного времени обслуживания всех КСИ:

$$L_1 = 6x_{11} + 6x_{21} + 3x_{31} + 2x_{22} + 2x_{32} + \\ + 9x_{42} + 3x_{13} + 2x_{23} + 4x_{33} + 8x_{43} \to \min$$

при условии обеспечения гарантированных поверок всех трех КСИ:

$$\begin{cases} x_{11} + x_{31} + x_{41} \ge 3 \\ x_{11} + x_{21} \ge 2 \\ x_{31} \ge 1 \\ x_{21} + x_{41} \ge 0 \end{cases},\quad \begin{cases} x_{12} + x_{32} + x_{42} \ge 0 \\ x_{12} + x_{22} \ge 1 \\ x_{32} \ge 1 \\ x_{22} + x_{42} \ge 3 \end{cases},$$

$$\begin{cases} x_{13} + x_{33} + x_{43} \ge 3 \\ x_{13} + x_{23} \ge 1 \\ x_{33} \ge 4 \\ x_{23} + x_{43} \ge 2 \end{cases}.$$

Поскольку матрица ЗЛП имеет блочную структуру, то, используя принцип декомпозиции, будем решать три независимых задачи о минимуме времени поверки для каждого КСИ.

Сформулируем каждую из трех ЗЛП.

1. Требуется организовать поверки всех СИ так, чтобы время поверки 1-го КСИ было минимальным:

$$\begin{cases} L_1 = 6x_{11} + 6x_{21} + 3x_{31} \to \min \\ x_{11} + x_{31} + x_{41} \ge 3 \\ x_{11} + x_{21} \ge 2 \\ x_{31} \ge 1 \\ x_{21} + x_{41} \ge 0 \end{cases}.$$

2. Требуется провести поверки всех СИ так, чтобы время поверки 2-го КСИ было минимальным:

$$\begin{cases} L_2 = 2x_{22} + 2x_{32} + 9x_{42} \to \min \\ x_{12} + x_{32} + x_{42} \ge 0 \\ x_{12} + x_{22} \ge 1 \\ x_{32} \ge 1 \\ x_{22} + x_{42} \ge 3 \end{cases}.$$

3. Требуется провести поверки всех СИ так, чтобы время поверки 3-го КСИ было минимальным:

$$\begin{cases} L_3 = 3x_{13} + 2x_{23} + 4x_{33} + 8x_{43} \to \min \\ x_{13} + x_{33} + x_{43} \geq 3 \\ x_{13} + x_{23} \geq 1 \\ x_{33} \geq 4 \\ x_{23} + x_{43} \geq 2 \end{cases}.$$

Поскольку третья координата для характеристических векторов РЭ равна единице только для 3-го РЭ, то передача размера третьей величины возможна только при использовании 3-го РЭ. При этом третий эталон будет использоваться для передачи величин для 1-го и 2-го КСИ ровно по одному разу, а для 3-го КСИ — ровно четыре раза. Поэтому сразу потребуем $x_{31} = 1$, $x_{32} = 1$, $x_{33} = 4$ и третьи по счету неравенства во всех трех ЗЛП учитывать не будем. В результате реше ния сформулированных ЗЛП с учетом отмеченных выше условий получим матрицу решений:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 4 \\ 2 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Технологическая матрица, полученная почленным перемножением матриц T и X, имеет вид:

$$TEX = X \otimes T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 12 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 16 \\ 0 & 18 & 8 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, время обслуживания трех КСИ: $L_1 = 15$, $L_2 = 22$, $L_3 = 26$ соответственно. При этом время загрузки РЭ: $P_1 = 0$, $P_2 = 16$, $P_3 = 21$, $P_4 = 26$. Отметим, что первый эталон не используется совсем, а третий эталон целесообразно использовать только для обслуживания КСИ-2 и КСИ-3.

Оценка снизу для времени обслуживания всех КСИ:

$$L^- = \max\{L_1, L_2, L_3\} = 26.$$

Опишем результаты решения задачи построения последовательности проведения поверок для каждого РЭ. Отметим, что такая последовательность может быть построена не единственным образом [14, 20]. Один из вариантов последовательности представлен на рис. 1.

Общее время нахождения технической системы на метрологическом обслуживании равно 26. В рассмотренном примере оно совпадает с оценкой снизу L^-. Отметим, что при решении ряда практических задач построения последовательности проведения поверок общее время нахождения системы на обслуживании может значительно превосходить величину L^- [14, 15, 19, 20].

Рис. 1. Построение последовательности использования РЭ для поверок КСИ

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан научно-методический подход к оптимизации процесса проведения поверок СИ с помощью РЭ, основанный на решении серии ЗЛП. Решение ЗЛП позволяет разрабатывать оптимальные планы проведения поверок и строить последовательности проведения поверок, реализующие оптимальные планы.

2. Установлено, что если система ограничений ЗЛП может быть представлена в виде симплекс-формы с единичными по модулю коэффициентами при неизвестных, то решение соответствующей ЗЛП также будет целочисленным. При выполнении указанных условий появляется возможность использовать для решения целочисленной ЗЛП стандартный симплекс-метод, который имеет существенно меньшую трудоемкость по сравнению с общими методами решения целочисленной ЗЛП.

Литература

1. Кузнецов В.А., Исаев Л.К., Шайко И.А. Метрология. М.: Стандартинформ, 2005. 298 с.

2. Берка К. Измерения: понятие, теория, проблемы / под ред. Б. В. Бирюкова. М.: Прогресс, 2007. 320 с.

3. Сычев Е.В., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы военной метрологии. М.: Военное изд-во, 1993. 400 с.

4. Бачурин Д.П., Яшин А.В. Аттестация программного обеспечения информационно-измерительных систем, входящих в состав испытательного оборудования // Вестн. Метролога, 2013. № 4. С. 8-12.

5. Орлов В.А., Бывших Д.М., Ярыгин Ю.Н. Автоматизация процессов планирования развития техники радиоэлектронной борьбы // Вооружение и экономика, 2015. № 4 (33). С. 75-83.

6. Дьяков А.Н., Решетников Д.В., Бояршинов С.Н. Моделирование системы поддержания работоспособного состояния сложных технических систем // Вооружение и экономика, 2016. № 3 (36). С. 35-43.

7. Кувик Т.Е., Сафонов А.А., Цыбульникова К.А. Оценка трудоемкости оказания научно-технических услуг в области метрологии на примере экспертизы документации, проводи-

мой с целью выдачи заключений о возможности применения средств измерений для комплектации вооружения и военной техники // Сб. тр. Гл. науч. метролог. центра Минобороны России, 2016. № 39. С. 69-80.

8. Хайруллин Р.З. К разработке математической модели прогнозирования уровня исправности парка измерительной техники // Научное обозрение, 2016. № 22. С. 243-247.

9. Костоглотов А.А., Лазаренко С.В. Метод решения обратных измерительных задач с применением аппарата негладкого анализа // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2009. Т. 7, № 10. С. 38–45.

10. Костоглотов А. А., Лазаренко С. В. Негладкий анализ в задачах обработки измерительной информации // Измерительная техника, 2009. № 2. С. 6–11.

11. Прищепа А.Н., Шулунов А.Н. Современное состояние и проблемы развития отечественного приборостроения // Вестн. Метролога, 2012. № 1. С. 4-7.

12. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1961. 391 с.

13. Bryson A., Ho Y. Applied Optimal Control. Blaisdell Publishing. Walthman. MA. 1969. 481 p.

14. Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. М.: Мир, 1985. 512 с.

15. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с пол. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия; Телеком, 2006. 452 с.

16. Myerson R.B. Games theory: analysis of conflict. London: Harvard University Press, 1991. 600 p.

17. Fudenberg D., Tirole J. Game theory. Cambridge: MIT Press, 1995. 579 p.

18. Nisan N., Roughgarden T. Tardos E., Vazirani V. Algorithmic game theory. N.-Y.: Cambridge University Press, 2009. 771 p.

19. Broomhead D.S., Lowe D. Multivariable functional interpolation and adaptive networks // Complex Systems, 1988. № 2. P. 23-26.

20. Cichocki A., Unbehauen R. Neural Networks for Optimization and Signal Processing. Wiley, 1993. 548 p.

21. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978. 488 с.

22. Хайруллин Р.З. К оптимизации систем высокой размерности с использование компонентов ПО ILOG // Вестн. МГСУ, 2013. № 8. С. 157-163.

References

1. Kuznetsov V.A., Isaev L.K., Shaiko I.A. Metrology. M.: Standartinform. 2005. 298 p.

2. Berka K. Measurement: concept, theory and problems / pod red. B. V. Biryukova. M.: Progress, 2007. 320 p.

3. Sychev E.B., Khramenkov V.N., Shkitin A.D. Fundamentals of military metrology. M.: Voennoe izd-vo, 1993. 400 p.

4. Bachurin D.P., Yashin A.V. Certification of the software of information-measuring systems comprising test equipment // Vestn. metrologa. 2013. № 4. P. 8-12.

5. Orlov V.A., Byvshikh D.M., Yarygin Yu.N. Automation of processes of planning of development of electronic warfare equipment // Armament and Economics. 2015. № 4 (33). P. 75-83.

6. D'yakov A.N., Reshetnikov D.V., Boyarshinov S.N. Modeling system for the maintenance of a healthy state of complex technical systems // Armament and Economics. 2016. № 3 (36). P. 35-43.

7. Kuvik T.E., Safonov A.A., Tsybul'nikova K.A. Evaluation of the complexity of providing scientific and technical services in the field of metrology, for example, examination of documentation carried out for the purpose of issuing opinions on the possible use of measuring instruments for acquisition of weapons and military equipment // Sb. tr. Gl. nauch. metrolog. tsentra Minoborony Rossii. 2016. № 39. P. 69-80.

8. Khairullin R.Z. To development of a mathematical model for predicting the level of the health Park of measuring equipment // *Science Review*. 2016. № 22. P. 243-247.

9. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V. Method for solving the inverse measuring tasks with application of nonsmooth analysis // Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. 2009. T. 7, № 10. P. 38-45.

10. Kostoglotov A. A., Lazarenko S. V. Nonsmooth analysis in problems of processing measurement data // Measurement Techniques. 2009. № 2. P. 6-11.

11. Prishchepa A.N., Shulunov A.N. Current status and problems of development of domestic instrument engineering // Vestn. metrologa. 2012. № 1. P. 4-7.

12. Pontryagin L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. Mathematical theory of optimal control. M.: Nauka, 1961. 391 p.

13. Bryson A., Ho Y. Applied Optimal Control. Blaisdell Publishing. Walthman. MA. 1969. 481 p.

14. Papadimitriu Kh., Staiglits K. Combinatorial optimization. Algorithms and complexity. M.: Mir, 1985. 512 p.

15. Rutkovskaya D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. Neural networks, genetic algorithms and fuzzy system / per. s pol. I.D. Rudinskogo. M.: Goryachaya liniya; Telekom. 2006. 452 p.

16. Myerson R.B. Games theory: analysis of conflict. London: Harvard University Press, 1991. 600 p.

17. Fudenberg D., Tirole J. Game theory. Cambridge: MIT Press, 1995. 579 p.

18. Nisan N., Roughgarden T. Tardos E., Vazirani V. Algorithmic game theory. N.-Y.: Cambridge University Press, 2009.

19. Broomhead D.S., Lowe D. Multivariable functional interpolation and adaptive networks // Complex Systems. 1988. № 2. P. 23-26.

20. Cichocki A., Unbehauen R. Neural Networks for Optimization and Signal Processing. Wiley, 1993. 548 p.

21. Fedorenko R.P. Approximate solution of optimal control problems. M.: Nauka, 1978. 488 p.

22. Khairullin R.Z. Optimization of high dimensionality systems using ILOG software components // Vestn. MGSU. 2013. № 8. P. 157-163.