



УДК 674.09:630\*

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.119

## ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ РАДИОНУКЛИДАМИ

*А.С. Торопов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.*

*А.Н. Заикин<sup>2</sup>, д-р техн. наук, доц.*

*В.М. Меркелов<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.*

<sup>1</sup>Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; e-mail: zaikin.anatoliy@yandex.ru

<sup>2</sup>Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке-Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; e-mail: vmerkelov55@mail.ru

В результате техногенных аварий, в том числе на Чернобыльской атомной электростанции, значительная часть лесных массивов страны подверглась радиоактивному загрязнению. Использование древесины из таких регионов весьма актуально, так как позволяет решать также и экологические проблемы за счет снижения вероятности повторного заражения радионуклидами прилегающих территорий. Предлагается решать их на основе технологии переработки загрязненной радионуклидами древесины на базе мобильных установок, работающих непосредственно на лесосеке от бензиновых или дизельных двигателей через карданный вал. Это позволит избежать перевозки загрязненной древесины в чистые регионы, организовать переработку без строительства стационарных цехов и уменьшить затраты на ее переработку. Для реализации такой технологии нами предложены схемы раскря древесины, загрязненной радионуклидами, позволяющие получать пилопродукцию требуемых размеров, не содержащую радионуклидов. При этом решаются задачи оптимального планирования раскря бревен различного диаметра путем включения в план раскря только тех поставов, которые обеспечат выпилку пиломатериалов нужных размеров с допустимым содержанием радионуклидов при наименьших затратах сырья. Эта технология разрешает с минимальными потерями заготавливать и отгружать потребителю «чистую» древесину в виде окоренного сырья или готовых пиломатериалов. Наиболее целесообразно изготавливать продукцию, которая исключает прямой контакт с людьми, например шпалы. Образующиеся при этом радиоактивные отходы древесины предложено утилизировать путем измельчения и захоронения непосредственно на лесосеке или методами газификации с помощью газогенератора, который позволяет получать генераторный газ с минимальным уровнем загрязнения радионуклидами.

*Ключевые слова:* радионуклиды, загрязнение, окорка, лесосека, раскря, шпалы, оптимальное планирование.

---

*Для цитирования:* Торопов А.С., Заикин А.Н., Меркелов В.М. Особенности переработки древесины, загрязненной радионуклидами // Лесн. журн. 2017. № 1. С.119–128. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.119.

В результате аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) радиационному загрязнению подвергся лесной фонд на площади около 1 млн га [1, 8]. Радиоактивное загрязнение лесных экосистем создало такие условия, при которых в течение многих лет невозможно обычное многоцелевое использование леса [13]. Леса, подвергшиеся радиационному воздействию от выбросов ЧАЭС, представляют собой серьезную экологическую опасность в связи с возможностью возникновения пожаров как от воздействия человека, так и вследствие естественных причин [5]. При этом наблюдается быстрое перемещение в пространстве наиболее токсичных и опасных излучателей – плутония-239 и стронция-90. В связи с тем, что площади земель лесного фонда, загрязненные цезием-137, располагаются на территориях 15 субъектов Российской Федерации, вопросы организации использования древесины на этих территориях весьма актуальны.

Проведенные ранее исследования [3, 12] показали, что древесина, заготовленная в лесных массивах первой зоны загрязнения радионуклидами, может быть использована в промышленных целях после окорки, древесина из лесных массивов второй и последующих зон загрязнения – при условии полной очистки бревен от коры и снятия наиболее загрязненного внешнего слоя.

Цель данной работы – предложить пути получения «чистой» древесины в виде окоренного сырья или готовых пиломатериалов. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи: определить место переработки древесины; подобрать необходимое оборудование; разработать методику оптимального планирования раскроя бревен, загрязненных радионуклидами.

Для получения чистой древесины необходимо выполнять целый ряд технологических операций – окорку, распиловку, переработку отходов от распиловки и раскряжевки. Предпочтение следует отдавать мобильным установкам, работающим от бензиновых или дизельных двигателей путем отбора мощностей [7]. Для выполнения технологических операций целесообразно использовать одну из предлагаемых нами ранее схем [3].

Окорка сортиментов выполняется передвижным окорочным станком с приводом от вала отбора мощности трактора. Погрузка окоренных сортиментов на подвижной состав может осуществляться манипуляторным погрузчиком или самогружающимся автомобилем, который устанавливается в удобном для погрузки месте.

В районах второй и последующих зон загрязнения удельная активность цезия-137 превышает допустимые нормы не только в коре, но и в верхнем 3-сантиметровом слое древесины. Проводить окорку в таких случаях нецелесообразно, так как все равно необходимо удалять верхний слой древесины.

При переработке древесины, зараженной радионуклидами, невозможно их полностью удалить, незначительная часть все равно остается в древесине. Поэтому из такой древесины целесообразно изготавливать продукцию, которая будет эксплуатироваться там, где не будет прямого контакта с человеком

(например, шпалы). Производство шпал не сопряжено с большим количеством операций и является наименее трудоемким. До настоящего времени они находят широкое применение, так как Россия располагает самой большой в мире протяженностью железных дорог (более 50 % грузоперевозок в стране осуществляется железнодорожным транспортом). Шпалы, полученные из загрязненной древесины, необходимо использовать на территориях, подвергшихся радиационному воздействию.

Нами предложена технологическая схема процесса производства шпал из круглых лесоматериалов, пораженных радионуклидами. Раскряжевка таких хлыстов осуществляется в соответствии с предлагаемой нами схемой [11], продольный раскрой полученных в результате раскряжевки сортиментов на пилопродукцию – по схеме, предложенной авторами и защищенной патентом РФ [9].

Для предлагаемых вариантов технологических процессов в настоящее время можно использовать мобильные установки как отечественного, так и зарубежного производства. Сортименты диаметром свыше 22 см можно очищать от коры, вывозить для дальнейшего использования или распиловки на мобильных лесопильных рамах, ленточнопильных или круглопильных установках на обрезные пиломатериалы и отгружать потребителю. Для переработки сортиментов диаметром менее 22 см в технологический процесс лесосечных работ можно включать передвижную фрезернопильную установку типа УПП-1М, которая даст возможность практически все сортименты диаметром в верхнем торце 6...18 см и в комле до 22 см переработать в пиломатериалы. Оставшуюся древесину диаметром в верхнем торце меньше 6 см (вершинки и сучья) можно измельчать в передвижной рубильной машине типа ДОП-1.

Изготовление шпал можно организовать с помощью мобильного ленточнопильного станка «Тайга» с автономным двигателем внутреннего сгорания. Для распиловки ленточной пилой пильного механизма, перемещаемого по рельсовым направляющим вдоль горизонтальной плоскости обрабатываемого материала, нами предложена схема раскроя [9, 10], включающая деление лесоматериалов в продольном направлении на пиломатериалы параллельно их продольной оси. При этом лесоматериал фиксируют за здоровую периферийную зону, определяют форму и параметры пораженного слоя и выполняют деление в продольном направлении по взаимно перпендикулярным плоскостям, параллельно образующей, по касательной к внутренней границе пораженного слоя.

Полученный брус, имеющий зоны, загрязненные радионуклидами, далее делят в продольном направлении по взаимно перпендикулярным плоскостям через линии контакта здоровой древесины с оставшимся пораженным слоем. В результате получается чистая пилопродукция.

Критерием оптимизации, который учитывает два разнонаправленных процесса, является наименьшее содержание радионуклидов в пиломатериалах. При этом целевая функция (модель) принимает следующий вид:

$$W = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \frac{\sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^z \lambda_{ijkl} q_{ijkl}}{\lambda_{ik} \left( \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^z q_{ijkl} \right)^2} Q_{ik} X_{ik} \rightarrow \min$$

при ограничениях:

на ресурсы пиловочного сырья

$$\sum_{k=1}^n X_{ik} \leq Z_i; i = 1, 2, \dots, m;$$

на объем получаемых пиломатериалов стандартных типоразмеров

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^z q_{ijkl} X_{ik} \geq V_j; j = 1, 2, \dots, r;$$

на удельную активность радионуклидов в доске

$$\lambda_{ijkl} \leq \lambda_{\text{доп}}; i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, r; l = 1, 2, \dots, z$$

при граничных условиях:

$$X_{ik} \geq 0; i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n.$$

Ниже приведены условные обозначения, используемые при построении модели.

1. Индексы:  $m$  – число групп пиловочного сырья, подлежащего раскрою на пиломатериалы;  $i$  – номер группы пиловочного сырья ( $i = 1, 2, \dots, m$ );  $n$  – число поставок для раскроя пиловочного сырья;  $k$  – номер поставка ( $k = 1, 2, \dots, n$ );  $r$  – число типоразмеров пиломатериалов, получаемых при раскросе;  $j$  – номер типоразмера пиломатериала ( $j = 1, 2, \dots, r$ );  $l$  – количество досок одного сечения ( $l = 1, 2, \dots, z$ ).

2. Параметры:  $Z_i$  – объем  $i$ -й группы пиловочного сырья;  $V_j$  – объем пиломатериалов  $j$ -го типоразмера;  $H_i$  – нормативный выход пиломатериалов;  $Q_{ik}$  – объем бревна  $i$ -й группы распиливаемого  $k$ -м поставом;  $q_{ijkl}$  – объем пиломатериала  $j$ -го стандартного типоразмера, полученный из сырья  $i$ -й группы по  $k$ -му поставу;  $\lambda_{ijkl}$  – удельная активность радионуклидов в пилопродукции, Бк/кг;  $\lambda_{il}$  – удельная активность радионуклидов в бревне, Бк/кг;  $\lambda_{\text{доп}}$  – допустимая удельная активность радионуклидов в пилопродукции.

3. Переменная  $X_{ik}$  – количество бревен  $i$ -й размерной группы, раскросенных по  $k$ -му поставу.

Для составления оптимального плана раскроя сырья необходимо проанализировать множество различных вариантов поставок. При этом задача оптимального планирования раскроя бревен различного диаметра заключается в том, чтобы из этих поставок в план раскроя, составляемый для всего заданного сырья, включать только те поставки, которые обеспечат выпилку пиломатериалов нужных размеров с допустимым содержанием радионуклидов при наименьших затратах сырья.



задаем значение переменной  $m$ , соответствующей числу досок в поставе с одной стороны от оси торца бревна; значение переменной  $m$  принимаем в пределах от 4 до 10 с градацией 1;

формируем массив возможных поставов  $P(N_1, N_2, \dots, N_k)$ , количество элементов этого списка изначально равно 0, где  $k$  – количество возможных неповторяющихся поставов;

формируем массив  $N(1_1, 1_2, \dots, 1_m)$ , значения элементов этого массива соответствуют индексам толщин досок в массиве  $T$ , данный массив добавляем в список  $P$ ;

организуем цикл до тех пор, пока значение переменной  $N_1$  не будет равной  $n$ ; внутри цикла увеличиваем на одно значение последнего элемента массива  $N_m$ ; изменение значений массива  $N$  происходит по правилам  $n$ -ричного исчисления с условием, что  $N_{m-1} \leq N_m$ , где  $m$  – количество порядков; в результате получаем новый постав, который записываем в массив  $P$ ; условие  $N_{m-1} \leq N_m$  при генерации поставов обеспечивает уменьшение толщины досок от центра бревна к периферии, что ведет к сокращению отходов;

заменяем значения массивов  $N$ , содержащихся в списке  $P$ , на значения массива  $T$ ; в результате этой замены получаем список возможных комбинаций досок; формируем массив  $D(d_1, d_2, \dots, d_m)$ , каждому элементу которого присваиваем значения диаметров, подлежащих распиловке;

на основе двух массивов  $P$  и  $D$  формируем массив  $R(r_1, r_2, \dots, r_m)$  таким образом, что  $r_j = t_{d_j}$  для  $j = 1, 2, \dots, m$ ; сформированный массив  $P$  представляет половину первого сгенерированного симметричного постава, состоящего из досок одинаковой толщины, соответствующей значению первого элемента массива  $T$ ; сгенерированный постав записываем в базу данных.

Алгоритм генерации поставов для брусско-развального способа раскря аналогичен приведенному выше, за исключением того, что предварительно определяется толщина бруса, равная стандартной ширине обрезной доски в пределах от 0,6 до 0,8 вершинного диаметра. При генерации второго прохода массив  $T$  формируется из толщин боковых досок, полученных при первом проходе.

В матрице исходных данных можно выделить два блока строк: первый блок содержит информацию о получаемых пиломатериалах, второй – об использовании сырья.

Первый блок строк заполняется при последовательном переборе всех поставов. При этом в матрицу помещаются значения объемов пиломатериалов стандартного сечения, получаемых при раскряе сырья соответствующего диаметра. В столбцах первой строки матрицы содержатся значения целевой функции – объемы пиломатериалов, получаемых при раскряе сырья  $i$ -го диаметра ( $i = 1, 2, \dots, m$ )  $j$ -м поставом ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Второй блок строк содержит число строк, равное количеству типоразмеров материалов и сырья. В матрицу помещают значения объемов обрезных пиломатериалов с учетом объема части доски из загрязненной зоны, имеющиеся в наличии объемы сырья и требуемые объемы пиломатериалов.

Для решения задачи оптимизации производства пиломатериалов использована программа, реализующая симплекс-метод.

Учитывая, что получение зависимостей влияния различных геометрических характеристик сырья, толщины слоя древесины, загрязненного радионуклидами свыше нормативных значений на удельную активность пиломатериалов, достаточно трудоемкий процесс и требует большого количества времени и материальных затрат, нами было разработано соответствующее программное обеспечение.

Предлагаемая нами технология позволяет с минимальными потерями заготовить и отгрузить потребителю чистую древесину в виде окоренного сырья или готовых пиломатериалов.

Наиболее предпочтительные методы утилизации образующихся при этом радиоактивных отходов древесины:

измельчение непосредственно на лесосеке и захоронение в специально подготовленные траншеи;

равномерное распределение по окружающей территории [4];

утилизация (газификация) с помощью газогенератора [2], которая позволяет уменьшить возможность загрязнения генераторного газа радиоактивными веществами при переработке древесины в районах, загрязненных радионуклидами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борзенков Ю.А., Шубина О.А., Спиридонов С.И., Фесенко С.В. Прогнозирование распределения  $^{137}\text{Cs}$  по компонентам древесного яруса леса при различных источниках радиоактивного загрязнения // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2005. Вып. 63. С. 457–458.

2. Газогенератор для переработки древесных радиоактивных отходов: пат. 2073926 РФ, МПК G 21 F 9/32 / Колчанов Г.Г., Наганов А.В., Савушкин И.А., Дубровский В.Д. // Изобретения. Полезные модели. 1997. № 6.

3. Заикин А.Н., Меркелов В.М. Технология и оборудование заготовки и переработки древесины, загрязненной радионуклидами. Брянск: БГИТА, 2012. 266 с.

4. Заикин А.Н., Меркелов В.М. Технология использования древесины с территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: сб. докл. IV Междунар. науч. эколог. конф. Краснодар: Кубанский госагроуниверситет, 2015. Ч. II. С. 573–575.

5. Кузнецов А.В., Москвиллин Е.А., Федоткин Д.В., Зверева-Степная А.В. Экологические последствия лесных пожаров на радиоактивно загрязненной местности. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-posledstviya-lesnyh-pozharov-na-radioaktivno-zagryaznennoy-mestnosti>

6. Меркелов В.М., Заикин А.Н., Богданова Ю.А. Алгоритм генерации поставок при раскросе сырья, загрязненного радионуклидами // Под общей ред. Е.А. Памфилова // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. Вып. 37. Брянск: БГИТА, 2013. С. 164–166.

7. Меркелов В.М., Макеева А.А. Мобильные установки для переработки древесины, загрязненной радионуклидами // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Кострома: КГТУ, 2013. С. 132–134.

8. Руководство по ведению лесного хозяйства в зонах радиоактивного загрязнения от аварии на Чернобыльской АЭС (на период 1997–2000 гг.). Режим доступа: <https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fwww.forestforum.ru%2Finfo%2Fflaws%2Fmanagement%2Fradiation.doc&name=radiation.doc&lang=ru&c=57f69787f466&page=1>

10. Способ раскроса круглых лесоматериалов, пораженных радионуклидами: пат. 2350460 РФ, МПК В 27 В 1/00 / Торопов А.С., Торопов С.А., Меркелов В.М., Микрюкова Е.В., Шакирова А.И.; заявитель и патентообладатель Мар. ГТУ. № 2007117657/03; заявл. 11.05.07; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9.

9. Способ раскроса круглых лесоматериалов, пораженных радионуклидами: пат. 2247022 РФ, МПК В 27 В 1/00 / Торопов А.С., Меркелов В.М., Жидова Е.В., Краснова В.Ф.; заявитель и патентообладатель Мар. ГТУ. № 2007117657/03; заявл. 11.05.07; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9.

11. Торопов А.С., Меркелов В.М., Краснова В.Ф. Математическая модель определения объемного выхода пилопродукции при раскросе хлыстов, загрязненных радионуклидами // Лесн. журн. 2011. № 2. С. 124–129. (Изв. высш. учеб. заведений).

12. Торопов А.С., Меркелов В.М., Краснова В.Ф. Принципы моделирования раскроса древесины, загрязненной радионуклидами // Вестн. Красн.ГАУ. 2011. № 5. С. 7–11.

13. Panfilov A.V., Uspenskaya E.Ju. Rehabilitation of Radioactive Contaminated Forests. IAEA-TECDOC-1280. Radiation Legacy of the 20th Century: Environmental Restoration. Vienna, 2002, pp. 329–336.

Поступила 13.04.16

UDC 674.09:630\*

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.119

### **Peculiarities of Processing of Wood Polluted by Radioactive Nuclides**

*A.S. Toropov<sup>1</sup>, Doctor of Engineering Sciences, Professor*

*A.N. Zaikin<sup>2</sup>, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor*

*V.M. Merkelov<sup>2</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

<sup>1</sup>Volga State University of Technology, Lenina pl., 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; e-mail: zaikin.anatoliy@yandex.ru

<sup>2</sup>Bryansk State Engineering Technological University, Stanke-Dimitrova pr., 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; e-mail: Zaikin.Anatolij@yandex.ru, vmerkelov55@mail.ru

*For citation:* Toropov A.S., Zaikin A.N., Merkelov V.M. Peculiarities of Processing of Wood Polluted by Radioactive Nuclides. *Lesnoy zhurnal*, 2017, no. 1, pp. 119–128. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.119

As a result of the industrial accidents, including the accident at the Chernobyl nuclear power plant, a significant part of forests of the country was subjected to radioactive contamination. The use of wood from these regions is very important as it allows solving the environmental problems by reducing the probability of recontamination of surrounding areas with radionuclides. This problem can be fixed on the basis of the processing technology of wood contaminated with radionuclides with the use of mobile units in the felling sites operated from gasoline or diesel engines via the driveshaft. This enables to avoid transportation of contaminated wood in the clean regions, to organize the processing without the stationary plant constructions and to reduce the cost of processing. To implement such technology we offer the cutting schemes for wood, contaminated with radionuclides, which allow obtaining sawn timber of desired size, not containing radionuclides. This solves the problems of optimal planning of log cutting of various diameters by including only those sawing patterns in the optimum cutting plan that provide the desired size of sawing lumber with the permissible content of radionuclides at the lowest raw-materials consumption. This technology provide with minimal losses harvesting and shipping to a consumer of "clean" wood in the form of debarked raw material or finished lumber. The products, which eliminate a direct contact with people, such as sleepers, make the most sense. The resulting radioactive waste wood can be disposed by shredding and landfilled directly in a felling site or by the gasification methods using a gas generator producing mixture gas with a minimum level of radionuclide contamination

*Keywords:* radioactive nuclide, pollution, barking, felling site, sawing process, sleeper, optimal planning.

#### REFERENCES

1. Borzenkov Yu.A., Shubina O.A., Spiridonov S.I., Fesenko S.V. Prognozirovanie raspredeleniya  $^{137}\text{Cs}$  po komponentam drevesnogo yarusa lesa pri razlichnykh istochnikakh radioaktivnogo zagryazneniya [ $^{137}\text{Cs}$  Distribution Prediction According to the Components of the Forest Tree Layer with Different Sources of Radioactive Contamination]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sb. nauch. tr.* [Problems of Forest and Forestry], 2005, no. 63, pp. 457–458.
2. Kolchanov G.G., Naganov A.V., Savushkin I.A., Dubrovskiy V.D. *Gazogenerator dlya pererabotki drevesnykh radioaktivnykh otkhodov* [The Gas Generator for Wood Radioactive Waste Processing]. Patent RF, no. 2073926, 1997.
3. Zaikin A.N., Merkelov V.M. *Tekhnologiya i oborudovanie zagotovki i pererabotki drevesiny, zagryaznennoy radionuklidami* [Technology and Equipment for Harvesting and Processing of Timber, Contaminated with Radionuclides]. Bryansk, 2012. 266 p.
4. Zaikin A.N., Merkelov V.M. Tekhnologiya ispol'zovaniya drevesiny s territoriy, podvergnshikhsya radioaktivnomu zagryazneniyu [Technology of Wood Using in the Territories Affected by Radioactive Contamination]. *Problemy rekul'tivatsii otkhodov byta, promyshlennogo i sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva: sb. dokl. IV Mezhdunar. nauch. ekolog. konf.* [Problems of Reclamation of Waste of Household, Industrial and Agricultural Production: Proc. 4th Intern. Sci. Ecol. Conf.]. Krasnodar, 2015, ch. II, pp. 573–575.
5. Kuznetsov A.V., Moskvilin E.A., Fedotkin D.V., Zvereva-Stepnaya A.V. *Ekologicheskie posledstviya lesnykh pozharov na radioaktivno zagryaznennoy mestnosti* [Environmental Impacts of Forest Fires on the Contaminated Areas]. Available at:

<http://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-posledstviya-lesnyh-pozharov-na-radioaktivno-zagryaznennoy-mestnosti>.

6. Merkelov V.M., Zaikin A.N., Bogdanova Yu.A. Algoritm generatsii postavov pri raskroe syr'ya, zagryaznennogo radionuklidami [Algorithm of Sawing Pattern Generation when Sawing Process of Wood Contaminated with Radionuclides]. Ed. by E.A. Pamfilov. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa: sb. nauch. tr. Vyp. 37* [Actual Problems of the Forestry Complex: Proc. Vol. 37]. Bryansk, 2013, pp. 164–166.

7. Merkelov V.M., Makeeva A.A. Mobil'nye ustanovki dlya pererabotki drevesiny, zagryaznennoy radionuklidami [Mobile Units for the Wood Processing, Contaminated with Radionuclides]. *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa: materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Actual Problems and Prospects of Development of the Timber Industry: Proc. 2<sup>nd</sup> Intern. Sci. Eng. Conf.]. Kostroma, 2013, pp. 132–134.

8. *Rukovodstvo po vedeniyu lesnogo khozyaystva v zonakh radioaktivnogo zagryazneniya ot avarii na Chernobyl'skoy AES (na period 1997–2000 gg.)* [Guidelines for Forest Management in the Radioactive Contaminated Areas due to the Chernobyl Accident (for the Period of 1997–2000)]. Available at: <https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fwww.forestforum.ru%2Finfo%2Fflaws%2Fmanagement%2Fradiation.doc&name=radiation.doc&lang=ru&c=57f69787f466&page=1>.

9. Toropov A.S., Merkelov V.M., Zhidova E.V., Krasnova V.F. *Sposob raskroya kruglykh lesomaterialov, porazhennykh radionuklidami* [The Method of Round Timber Cutting Affected by Radionuclides]. Patent RF, no. 2247022, 2007.

10. Toropov A.S., Toropov S.A., Merkelov V.M., Mikryukova E.V., Shakirova A.I. *Sposob raskroya kruglykh lesomaterialov, porazhennykh radionuklidami* [The Method of Round Timber Cutting Affected by Radionuclides]. Patent RF, no. 2350460, 2007.

11. Toropov A.S., Merkelov V.M., Krasnova V.F. Matematicheskaya model' opredeleniya ob"emnogo vykhoda piloproductsii pri raskroe khlystov, zagryaznennykh radionuklidami [Mathematical Model for Determination of Three-Dimensional Output of Sawn Products in Cutting of Tree-Length Timber Polluted by Radionuclides]. *Lesnoy zhurnal*, 2011, no. 2, pp. 124–129.

12. Toropov A.S., Merkelov V.M., Krasnova V.F. Printsipy modelirovaniya raskroya drevesiny, zagryaznennoy radionuklidami [Principles of Cutting Modeling of Wood Contaminated with Radionuclides]. *Vestnik KrasGAU* [the Bulletin of KrasGAU], 2011, no. 5, pp. 7–11.

13. Pamfilov A.V., Uspenskaya E.Ju. Rehabilitation of Radioactive Contaminated Forests. *IAEA-TECDOC-1280. Radiation Legacy of the 20th Century: Environmental Restoration*. Vienna, 2002, pp. 329–336.

Received on April 13, 2016

---