Mikheevskiy EvgeniyVladimirovich – fourth year student of the direction 15.03.02 Technological machines and equipment of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ukhtinsky State Technical University", Ukhta, Russian Federation; e-mail: copyright.13@yandex.ru

DOI: 10.12737/article_5b2406110392b7.04979435
УДК 656*4

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ПО СЕТИ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ

доктор технических наук, профессор **О.Н. Бурмистрова**[1]
кандидат технических наук, доцент **Ю.Н. Пильник**[1]

1 – ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта, Российская Федерация

Основной целью управления движением транспортных потоков является эффективное использование существующей сети лесовозных автомобильных дорог с минимальными экономическими и социальными издержками для участников движения. Достижение указанной цели возможно при обоснованном применении методов решения оптимизационных задач адаптированных к реальным условиям функционирования лесовозного автомобильного транспорта. Один из основных типов задач организации перевозок – это оптимизация параметров транспортных сетей с учетом, как эксплуатационных показателей дорог, так и характеристик транспортных потоков, проходящих по ним. Особое внимание при этом уделяется моделям позволяющим решать указанные задачи не только на микроуровне (для отдельных автомобилей или участков дорог), так и на макроуровне, т.е. для оптимизации движения для сетей больших размеров. На микроуровне можно варьировать числом автомобилей и осуществляют движение по оптимальным маршрутам. Задача нахождения оптимальных маршрутов на микроуровне решается по мере вхождения автомобилей в сеть и движения по элементам сети. В то же время необходимо на макроуровне решать задачу оптимального распределения транспортных потоков, т.к. только в этом случае возможно получить решение, которое обеспечивает минимальное время поездки для всех автомобилей, находящихся в сети. При решении задач оптимального распределения транспортных потоков на сети лесовозных автомобильных дорог и маршрутной навигации для транспортных средств встает вопрос назначения критериев выбора наилучших решений. В основу этого заложена необходимость достижения наилучшего значения одной из целевых функций: выполнение транспортной работы с минимальным пробегом (кратчайшим расстоянием), минимальным временем поездки, максимальным использованием возможностей дорожной сети, минимальными экологическими издержками, эксплуатационными расходами и т.д. В статье предложены алгоритмы расчета оптимальных маршрутов на многокритериальной основе и оптимизации распределения транспортных потоков в сети. Перечень основных задач выглядит следующим образом: расчет оптимальных маршрутов от начального до конечного пункта по заданным критериям; расчет оптимальных маршрутов, проходящих через определенные промежуточные пункты; формирование альтернативных маршрутов.

Ключевые слова: система, оптимизация, транспорт, дорога, интенсивность, алгоритм, автомобиль.

CALCULATION OF OPTIMAL ROUTES OF TRANSPORT FLOWS ON THE NETWORK OF LOGGING ROADS

DSc (Engineering), Professor **O. N. Burmistrova**[1]
PhD (Engineering), Associate Professor **Yu. N. Pilnik**[1]

1– FSBEI HE «Ukhta State Technical University», Ukhta, Russian Federation

Abstract

The main purpose of traffic flow management is effective use of existing network of logging roads with minimal economic and social costs for road users. Achievement of this goal is possible with justified application of methods for solving optimization problems adapted to the real conditions of the operation of timber transport vehicles. One of the main types of transportation management tasks is optimization of transport network parameters, taking into account both road performance indicators and characteristics of traffic flows passing through them. Particular attention is paid to models that allow to solve these tasks not only at the micro level (for individual cars or road sections), but also at the macro level, i.e. to optimize traffic for large networks. At the micro level, you can vary the number of cars and drive along the optimal routes. The task of finding optimal routes at the micro level is solved as the cars enter the network and move along the network elements. At the same time, it is necessary to solve the problem of optimal distribution of traffic flows at the macrolevel. Only in this case it is possible to obtain a solution that provides a minimum travel time for all cars on the network. When solving problems of optimal distribution of traffic flows on the network of forest roads and route navigation for vehicles, the question arises of assigning criteria for choosing the best solutions. This is based on the need to achieve the best value of one of the objective functions: performance of transport work with a minimum mileage (shortest distance), minimum travel time, maximum use of road network, minimum environmental costs, operating costs, etc. The article proposes algorithms for calculating optimal routes on a multicriteria basis and optimizing the distribution of traffic flows in the network. The list of the main tasks is as follows: calculation of optimal routes from the initial to the final point according to the specified criteria; calculation of optimal routes passing through certain intermediate points; formation of alternative routes.

Keywords: system, optimization, transport, road, intensity, algorithm, car.

При разработке алгоритмов и программного обеспечения с учетом стохастичности и не стационарности движения в пространстве и времени применяются методы динамического программирования [1, 2]. При этом оптимальный маршрут может выбираться по кратчайшему расстоянию или по минимальному времени поездки.

Во втором случае в алгоритмы предусматривают расчет времени прохождения автомобилями дуги, как произведение ее длинны на удельное время проезда по этой дуге [3]:

$$T_{ij} = d_{ij}\, t_{ij}\,,$$

где T_{ij} - время проезда по дуге;

d_{ij} - длина дуги;

t_{ij} - удельное время поездки.

В дальнейших расчетах вместо длин дуг вносится время проезда дуги. В остальном алгоритмы решения оптимизационных задач остаются прежними.

Большинство существующих алгоритмов позволяют находить кратчайшие пути из начального узла до всех остальных, а от любого другого узла (промежуточного) необходимо заново начинать расчет принимая этот узел за первый.

Рассмотрим создание алгоритма построения дерева всевозможных путей от начальной до конечной точки, работающего с началом из любого промежуточного узла на следующем примере нахождения кратчайшего маршрута (рис. 1).

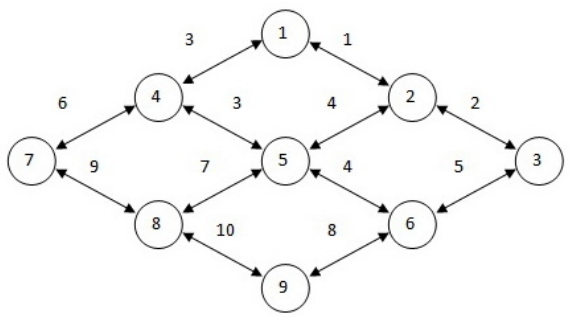

Рис. 1. Фрагмент сети для алгоритма

Для простоты предполагаем, что движение по любому участку возможно в обе стороны и длины путей в противоположных направлениях одинаковы.

Последовательность решения:

1. Формируем таблицу исходных данных (табл. 1): таблица заполняется следующим образом: в первом столбце записываются номера всех узлов, далее количество столбцов зависит от задачи. Мы находим максимальное количество дуг – n, выходящих из одного узла, а количество столбцов будет равным 2n. В данном случае n = 4. В первых 4-х столбцах мы записываем номера узлов, непосредственно соединенных, с узлом номер которого сто-

ит на пересечении заполняемой нами строки с первым столбцом. Если количество дуг, выходящих из данного узла, меньше максимального, то остальные ячейки мы не заполняем. В последних 4-х столбцах мы записываем длины дуг, соединяющих непосредственно соединенные узлы, в том порядке в котором записаны номера узлов.

Например: Узел (4) соединен с узлами (1), (5), (7), а длины дуг, соединяющие их следующие:

(4)→(1) = 3, (4)→ (5) = 3, (4)→ (7) = 6.

2. Задаем начальную и конечную точку расчета (в примере: 1 узел - начальная точка; 9 - узел конечный)

Таблица 1

Исходные данные для нахождения кратчайшего маршрута

Номер узла	Номера узлов, непосредственно соединенных с узлом из 1-го столбца				Длины дуг, соединяющие узлы.			
1	2	4	нет	нет	1	3	нет	нет
2	1	3	5	нет	1	2	4	нет
3	2	6	нет	нет	2	5	нет	нет
4	1	5	7	нет	3	3	6	нет
5	2	4	6	8	4	3	4	7
6	3	5	9	нет	5	4	8	нет
7	4	8	нет	нет	6		нет	нет
8	5	7	9	нет	7		10	нет
9	6	8	нет	нет	8	10	нет	нет

3. Начинаем заполнять дерево всевозможных путей (рис. 2).

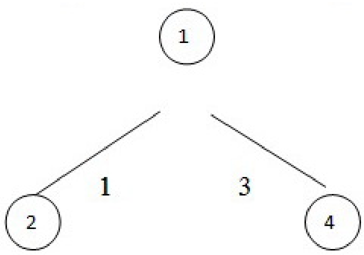

Рис. 2. Первый шаг формирования дерева возможных маршрутов.

Вершиной дерева является начальная точка т.е. точка (1). Ветвями, отходящими от (1), являются узлы непосредственно связанные с (1). На дугах записывается расстояние между соответствующими узлами.

4. Заполняем дерево всех возможных путей для новых узлов. Так же, как в пункте 3, но теперь при обращении к каждому последующему узлу, который непосредственно связан с узлами (2) или (4), мы проверяем встречался ли узел с данным номером в нашем дереве, если нет, то мы вносим его в дерево, а если встречался, то мы считаем длину пути от этого узла до вершины дерева, поднимаясь снизу вверх по дереву, и считаем длину пути от узла с таким же номеров до вершины, сравниваем длины этих путей и тот узел, до которого длина пути меньше, оставляем, а другой вычеркиваем из дерева (рис.3), а если длины путей одинаковы, то мы оставляем оба узла, в качестве альтернативных кратчайших путей.

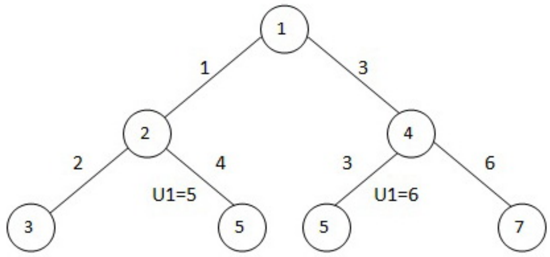

Рис. 3. Второй шаг формирования дерева возможных маршрутов

Так как узел (5) у нас повторяется, то при втором его появлении мы проделали процедуру описанную в пункте 4. Так как длины путей от узла (1) до узлов (5) по левой ветви U1=5, а по правой U2 = 6 и U1< U2, то более длинный путь мы вычеркиваем из дерева.

5. Проделываем пункт 4 для вновь появившихся узлов.

На данном шаге у нас повторяются узлы (4), (6), (8). Подсчитав длины путей получаем $V1 = 8 > V2 = 3$ для узла (4), $U1 = 8 < U2 = 9$ для узла (6), $R1 = 12 < R2 = 18$ для узла (8), а следовательно, вычеркнули узлы, расстояния до которых равны *V1, U2, R2* (рис.4.).

6. Проделываем пункт 4 для вновь появившихся узлов (рис. 5). На данном шаге у нас повторяются узлы (5), (7), (9). Подсчитав длины путей получаем $V1 =15 < V2 = 22$ для узла (9), $U1 = 12 > U2 = 5$ для узла (5), $R1 = 21 > R2 = 9$ для узла (7), а следовательно вычеркнули узлы расстояния до которых равны *V2, U1, R1* (рис.5). Так как в основании дерева остались только зачеркнутые узлы и

узел с номером 9-конечный узел, то мы заканчиваем подсчет. В итоге мы получили длину кратчайшего пути от узла (1) до узла (9) равной 15, а сам кратчайший путь выглядит следующим образом: (1)→ (2)→ (3)→ (6)→ (9).

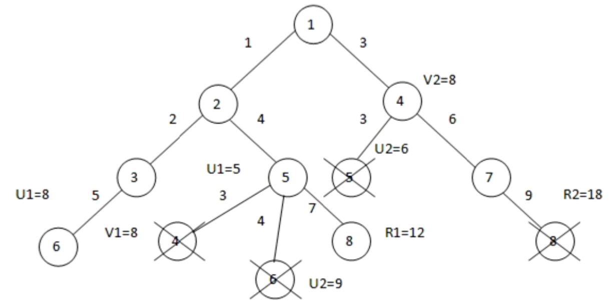

Рис. 4. Третий шаг формирования дерева возможных маршрутов

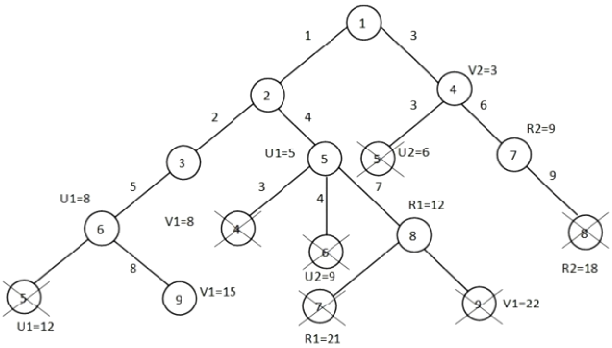

Рис. 5. Заключительный шаг формирования оптимального маршрута

Оптимальный маршрут может выбираться не только по кратчайшему расстоянию, но и по минимальному времени поездки.

Наша цель состоит не только в нахождении кратчайших путей, но и в распределении транспортных потоков таким образом, чтобы не создавать заторов на дорогах. У каждого участка дороги существует пропускная способность - *q (авт/ч)*, которая известна. С учетом пропускной способности каждого участка дороги, необходимо распределять транспортные потоки по сети таким образом, чтобы не превышать q_{max}. Для этого нужно постоянно прогнозировать реальную интенсивность q каждого участка дороги и не допускать превышение q_{max}. Для расчета интенсивности движения использовались формулы для зависимостей между интенсивностью, плотностью и скоростью [4, 9].

Основная диаграмма транспортного потока показывает, что одному значению q соответствует два значения k (рис. 6). В случае если при реализации алгоритма распределения транспортного потока накладывается ограничение на q в виде $q \le q_{max}$, то q может оказаться как в правой половине графика, так и в левой, но при значении, попадающем в левую часть графика, плотность не соответствует целевой установке оптимизации. Для исключения таких ситуаций необходимо для каждого участка дороги каждому q_{max}, соответствующему данному участку, поставить в соответствие k_{max} - максимальная плотность движения, которая нам так же известна для каждой дуги. Далее при распределении потоков следить за тем, чтобы $k \le k_{max}$ [7].

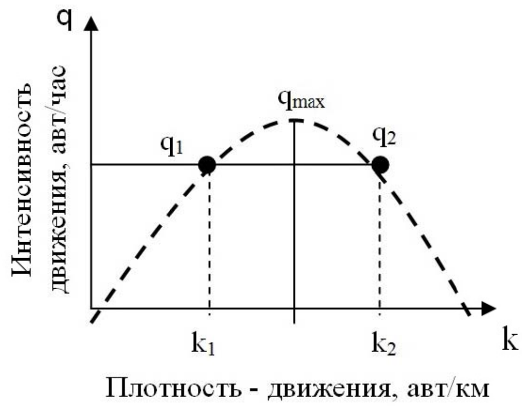

Рис. 6. Вид основной диаграммы транспортного потока

С учетом этого положения алгоритм оптимального распределения потоков в сети выглядит следующим образом:

1. Воспользуемся алгоритмом "нахождения кратчайшего пути", приведенного выше. Создадим еще одну таблицу аналогичную той, которую мы использовали в алгоритме, но в эту таблицу вместо длин дуг будем вносить разность между максимальной плотностью движения и плотностью движения в данный момент времени (k_j - k) для соответствующих дуг.

2. После нахождения кратчайшего пути, загружаем этот маршрут таким количеством транспорта, пока на каком либо отрезке этого пути величина (k_{max} - k) не станет равной 0. Как только это произошло, то мы запрещаем движение по этой

дуге, присваивая длину этой дуги = ∞, и пока (k_{max}-k) = 0, мы рассчитываем новый кратчайший путь от узла, в котором в данный момент времени находится объект, для которого ведется расчет, до конечного узла и проделываем для нового пути выше описанный алгоритм.

Рассмотрим еще одну задачу, для расчета оптимальных маршрутов проходящих через заданные узлы транспортной сети.

Существует две разновидности постановки указанной задачи [5, 6]:

- заданные пункты необходимо пройти в определенном порядке;

- порядок прохождения заданных пунктов определяется в соответствии с оптимальным маршрутом.

Рассмотрим решение этих типовых задач маршрутизации на фрагменте сети, приведенном на рис. 1.

Задача состоит в том, чтобы определить оптимальный маршрут из узла 1 в узел 9 с прохождением последовательно узлов 5 и 7. Для решения этой задачи используем алгоритм нахождения кратчайшего пути из пункта 1 в пункт 5, затем из пункта 5 в пункт 7 и потом из пункта 7 в пункт 9. В конечном счете получается 3 кратчайших маршрута, из которых формируется один.

Пример: найти кратчайший маршрут от узла 1 к узлу 9 через узлы 5 и 7.

Шаг 1: Находим кратчайший маршрут от узла 1 к узлу 5.

Этот маршрут проходит через узлы 1→2→5. Его длина = 5.

Шаг 2: Находим кратчайший маршрут от узла 5 к узлу 7.

Этот маршрут проходит через узлы 5→4→7. Его длина = 9.

Шаг 3: Находим кратчайший путь от узла 7 к узлу 9. Этот маршрут проходит через узлы 7→8→9. Его длина = 19.

Шаг 4: Объединяем все три маршрута и формируем один 1→2→5→4→7→8→9. Его длина = 33.

Во втором случае постановка задачи прежняя но порядок прохождения узлов не регламентируется, требуется найти кратчайший путь. Возможны два алгоритма решения:

А) В этом алгоритме используется приведенный выше алгоритм нахождения кратчайшего пути. Последовательность решения заключается в следующем. Сначала создадим таблицу кратчайших путей размерности (n+1)×(n+1), где n – это количество промежуточных узлов. Полученные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Кратчайшие пути между промежуточными узлами

Номера узлов	5	7	9
1	5, 1-2-5	9, 1-4-7	-
5	-	9, 5-4-7	12, 5-6-9
7	9, 7-4-5	-	19, 7-8-9

В первой строке этой таблицы перечислены номера промежуточных узлов, которые необходимо пройти и конечный узел. В первом столбце –начальный узел и промежуточные. На пересечении i-й строки и j-го столбца занесены сначала длина кратчайшего пути, а потом узлы, составляющие кратчайший путь, от узла, стоящего в i-й строке, до узла, стоящего в j-м столбце. Естественно не считаются кратчайшие расстояния от узла до себя самого и не считаем – от начального узла до конечного. Расчет оптимального маршрута производится с помощью алгоритма определения кратчайшего пути. После формирования таблицы строим дерево возможных путей от начального узла к конечному через заданные промежуточные узлы. В данном примере это дерево будет выглядеть следующим образом (рис. 7):

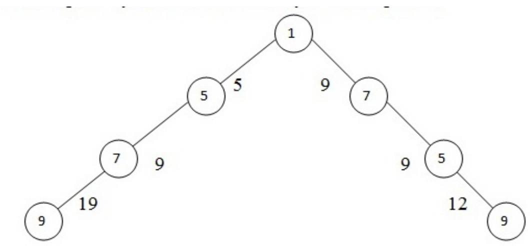

Рис. 7. Дерево возможных путей

Таким образом получено два различных пути:

Первый путь: 1→5→7→9

Второй путь: 1→7→5→9.

Затем необходимо определить какой из этих путей является более длинным. Из таблицы длины всех путей (они уже вынесены на график), участвующих в дереве, определим длину 1-го, длину 2-го пути, сравним их и отбросим наиболее длинный. Длина 1-го пути = 33, длина 2-го пути = 30, следовательно нас устраивает второй путь.

Теперь берем из таблицы номера узлов, которые входят в кратчайшие пути 1→7, 7→5, 5→9 и получаем искомый кратчайший путь: 1→4→7→4→5→6→9.

Вывод: Рассмотренные алгоритмы, основанные на методе сетевого планирования, позволяют перераспределять транспортные средства по сети лесовозных дорог, что приводит к уменьшению времени сетевой доставки лесоматериалов в целом.

Библиографический список

1. Вагнер, Г. Основы исследования операций. В 3-х т. [Текст] / Г. Вагнер ; пер. с англ. – М. : Мир, 1972.

2. Лэсдон, Л. Оптимизация больших систем [Текст] / Л. Лэсдон. – М. : Наука, 1975. – 432 с.

3. Сушков, С. И. Принципы решения задач управления в многоуровневых транспортно-производственных системах лесного комплекса [Текст] С. И. Сушков, О. Н. Бурмистрова, Ю. Н. Пильник // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11 (ч. 2). – С. 317-321.

4. Сушков, С. И. Разработка теоретических основ планирования и управления транспортными потоками в лесном комплексе [Текст] / С. И. Сушков, О. Н. Бурмистрова, Ю. Н. Пильник // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8 (6). – С. 1331-1335.

5. Сушков, С. И. Оптимизация параметров транспортных процессов на предприятиях лесопромышленного комплекса [Текст] / С. И. Сушков, О. Н. Бурмистрова, Ю. Н. Пильник // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11 (ч. 2). – С. 237-241.

6. Liyanage, C. Measuring Success of PPP Transport Projects: A Cross-Case Analysis of Toll Roads [Text] / C. Liyanage, F. Villalba-Romero // Transport reviews. – 2015. – Vol. 35. – Issue 2. – Special Issue: SI. – p. 140-161

7. Hare, W. A mixed-integer linear programming model to optimize the vertical alignment considering blocks and sideslopes in road construction [Text] / W. Hare, Y. Lucet, F. Rahman // European journal of operational research. – 2015. – Vol. 241. – Issue 3. – p. 631-641. 5.

8. Burdett, R. Block models for improved earthwork allocation planning in linear infrastructure construction [Text] / R. Burdett, E. Kozan, R. Kenley // Engineering optimization. – 2015. – Vol. 47. – Issue 3. – p. 347-369.

9. Setinc, M. Optimization of a highway project planning using a modified genetic algorithm [Text] / M. Setinc, M. Gradisar, L. Tomat // Optimization. – 2015. – Vol. 64. – Issue 3. – p. 687-707.

10. Janssen, T. S. Design and conctruction in existing contexts: Replacement of the first High Bridge Levensau [Text] // T. S. Janssen. – 2015. – Vol. 84. – Issue 3. – p. 182-194.

References

1. Vagner G. *Osnovy issledovaniya operatsiy* [Basics of Operations Research] . Moscow: Mir,1972.

2. Lesdon L. *Optimizatsiya bol'shikh sistem* [Optimization of large systems] Moscow: Science, 1975, 432 p.

3. Sushkov S. I., Burmistrova O. N., Pil'nik Yu. N. *Printsipy resheniya zadach upravleniya v mnogourov-nevykh transportno-proizvodstvennykh sistemakh lesnogo kompleksa* [Principles of solving management problems in multi-level transport-production systems of the forest complex]. *Fundamental'nye issle-dovaniya* [Basic research], 2015, no. 11 (2), pp. 317-321.

4. Sushkov S. I., Burmistrova O. N., Pil'nik Yu. N. *Razrabotka teoreticheskikh osnov planirovaniya i upravleniya transportnymi potoka-mi v lesnom komplekse* [Development of theoretical bases of planning and

management of transport streams in the forest complex]. *Fundamental'nye issle-dovaniya* [Basic research], 2014, no. 8 (6), pp. 1331-1335.

5. Sushkov S. I., Burmistrova O. N., Pil'nik Yu. N. *Optimizatsiya parametrov transportnykh protsessov na predpriyatiyakh lesopromyshlennogo kompleksa* [Optimization of the parameters of transport processes at the enterprises of the timber industry complex]. *Fundamental'nye issle-dovaniya* [Basic research], 2015, no. 11 (2), pp. 237-241.

6. Liyanage C., Villalba-Romero F. Measuring Success of PPP Transport Projects: A Cross-Case Analysis of Toll Roads. Transport reviews, 2015, Vol. 35, Issue 2, Special Issue: SI, pp. 140-161.

7. 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, Issue 3, pp. 631-641.

8. Burdett R., Kozan E., Kenley R. Block models for improved earthwork allocation planning in linear infrastructure construction. Engineering optimization, 2015, Vol. 47, Issue 3, pp. 347-369.

9. Setinc M., Gradisar M., Tomat, L. Optimization of a highway project planning using a modified genetic algorithm. Optimization, 2015, Vol. 64, Issue 3, pp. 687-707.

10. Janssen, T. Design and conctruction in existing contexts: Replacement of the first High Bridge Levensau., 2015, Vol. 84, Issue 3, pp. 182-194.

Сведения об авторах

Бурмистрова Ольга Николаевна – заведующий кафедрой технологий и машин лесозаготовок, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный университет», доктор технических наук, профессор, г. Ухта, Российская Федерация; e-mail: oburmistrova@ugtu.net

Пильник Юлия Николаевна – доцент, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный университет», кандидат технических наук, г. Ухта, Российская Федерация, e-mail: ypilnik@mail.ru.

Information about the authors

Burmistrova Olga Nikolaevna – Head of the Department of technology and machinery of logging , Federal state budgetary educational institution of higher professional education " Ukhta State Technical University ", doctor of technical Sciences, Professor, Ukhta, Russian Federation, e-mail: oburmistrova@ugtu.net.

Pilnik Yulia Nikolaevna – Associate professor, Federal State Budget Education Institution of Higher Professional Education «Ukhta State Technical University», PhD in Engineering, Ukhta, Russian Federation, e-mail: ypilnik@mail.ru.