

## Компьютерная симуляция в среде AnyLogic работы мобильной рубительной машины на лесосеке

С.Н. Долматов<sup>1a</sup>, Т.С. Бабкина<sup>2b</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Большая Печерская, 25/20, Нижний Новгород, Россия

<sup>a</sup> pipinaskus@mail.ru, <sup>b</sup> tbabkina@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2892-8831>

Статья поступила 29.04.2024, принята 15.05.2024

*Комплексное использование древесного сырья, получение возобновляемых биоэнергоресурсов — это современный тренд лесной промышленности развитых стран. Производство щепы из лесосечных отходов — один из технологических элементов рационального, экономного природопользования в интересах повышения выхода полезного валового продукта с единицы лесной площади и снижения негативного экологического влияния лесозаготовок. В работе рассмотрен вопрос моделирования технологического процесса производства щепы из лесосечных отходов посредством применения мобильных рубительных машин. Актуальность имитационного моделирования объясняется существенными преимуществами, реализуемыми в современных графоаналитических пакетах программ, а также ограничениями, связанными с возможностью и экономической целесообразностью натурального физического эксперимента с реальными машинами. В статье кратко приведена информация о работах других авторов в предметной области исследования. Имитационная модель работы мобильной рубительной машины разработана в среде имитационного моделирования AnyLogic. Имитационная модель является комбинированной агентно-дискретно-событийной моделью. В работе представлен алгоритм взаимодействия рубительной машины, транспортера щепы и предмета труда. Модель предусматривает возможность варьирования значительного числа факторов в интересах адаптации к конкретным лесозаготовительным и технологическим условиям. Применение разработанной имитационной модели позволяет провести программную симуляцию процесса очистки лесосеки от отходов в виде порубочных остатков посредством их переработки на щепу с последующим перемещением на склад хранения. Имитационный эксперимент позволяет оценить степень влияния различных факторов на целевые показатели производительности, загруженности и затрат на производство. Материалы работы могут использоваться для совершенствования технологий очистки лесосек, принятия решений при определении состава и сочетания технологического оборудования, необходимого для производства щепы на лесосеке.*

**Ключевые слова:** комплексное лесопользование; щепы; имитационное моделирование; технология; агент; AnyLogic.

## Computer simulation of the operation of a mobile chipper at a logging site in the AnyLogic environment

S.N. Dolmatov<sup>1a</sup>, T.S. Babkina<sup>2b</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Pros., Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup> HSE University; 25/12, Bolshaya Pecherskaya St., Nizhniy Novgorod, Russia

<sup>a</sup> pipinaskus@mail.ru, <sup>b</sup> tbabkina@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2892-8831>

Received 30.04.2024, accepted 01.05.2024

*The integrated use of wood raw materials and the production of renewable bioenergy resources is a modern trend in the forest industry of developed countries. The production of wood chips from logging waste is one of the technological elements of rational, economical use of natural resources in the interests of increasing the yield of useful gross product per unit of forest area and reducing the negative environmental impact of logging. The paper examines the issue of modeling the technological process of producing wood chips from logging waste through the use of mobile chippers. The relevance of simulation modeling is explained by the significant advantages realized in modern graphical-analytical software packages, as well as limitations associated with the possibility and economic feasibility of a full-scale physical experiment with real machines. The article briefly provides information about the work of other authors in the subject area of research. A simulation model of the operation of a mobile chipper is developed in the AnyLogic simulation environment. The simulation model is a combined agent-discrete-event model. The paper presents an algorithm for the interaction of a chipper, a chip conveyor and a work item. The model provides for the possibility of varying a significant number of factors in order to adapt to specific forest exploitation and technological conditions. The use of the developed simulation model makes it possible to carry out a software simulation of the process of clearing a cutting area from waste in the form of logging residues, through their processing into chips and subsequent movement to a storage warehouse. A simulation experiment makes it possible to assess the degree of influence of various*

factors on the target indicators of productivity, workload and production costs. The materials of the work can be used to improve technologies for cleaning cutting areas, making decisions when determining the composition and combination of technological equipment necessary for the production of wood chips at a cutting area.

**Keywords:** integrated forest management; wood chips; simulation modeling; technology; agent; *AnyLogic*.

**Введение.** Лесные массивы являются источниками стволовой древесины, топливного и технологического сырья. В России основной упор сделан на заготовку стволовой древесины. На протяжении десятков лет модель лесопользования строилась по экстенсивной технологии освоения лесных ресурсов. Вопросам комплексного использования древесного сырья уделялось недостаточное внимание. Вместе с тем, ведущие экономики Европы имеют устойчивый тренд перехода на биологически возобновляемые виды топливно-энергетических ресурсов. Для ЕС заявлено достижение углеродной нейтральности к 2050 г. [1]. Заготовка топливно-энергетического древесного сырья происходит преимущественно в виде технологической и топливной щепы. Например, в Италии около 80 % объемов заготовки древесины представлено топливным сырьем [2].

Заготовка технологического сырья может и должна стать прибыльной статьей лесного бизнеса. Если в РФ очистка лесосек является дополнительной и очень болезненной для лесозаготовителей статьей затрат, то, например, в Японии средние затраты на измельчение лесосечных отходов и валовая прибыль составляют 2 874,54 и 3 185,53 евро/га соответственно, т. е. каждый гектар территории лесосеки приносит дополнительно 310 евро прибыли [3].

Работы в области энергетического обеспечения, заготовки, транспортировки и переработки щепы активно ведутся в России и Белоруссии [4–6]. Помимо энергетического использования щепы находит широчайшее применение в виде сырья для производства плит, древесно-минеральных композитов и т. п. [7].

За рубежом успешно апробированы и получили достаточно широкое распространение технологии переработки на щепу целых деревьев, что обеспечивает больший полезный выход биомассы по сравнению с технологией сортиментной заготовки [8]. Качество древостоя, класс возраста и товарности оказывают важное влияние на выбор технологии его освоения. Технология переработки целых деревьев в насаждениях низкого качества позволяет получать большее количество полезной биомассы [9].

В любом случае, внедрение новой технологии, в частности, технологии получения технологической биомассы в виде щепы требует решения вопросов сочетания отдельных видов технологии, машин, места и способа их применения. Для обоснования и разработки необходимо иметь полевые данные, предусматривать и учитывать случайные факторы, неопределенности и т. п. Производственный эксперимент является наиболее достоверным механизмом, позволяющим оценить преимущества и недостатки технологии и машин в реальных лесозаготовительных условиях. Однако это весьма сложный, очень дорогостоящий процесс. Часто производственный эксперимент просто невозможен в

силу тех или иных причин. В этом случае компьютерная симуляция — моделирование является эффективным решением, позволяющим учесть максимальное число факторов в разработанной имитационной модели технологического процесса. Известны примеры успешного применения системы *AnyLogic* для моделирования технологического процесса работы харвестеров и форвардеров [10–12]. В работе [13] проводилось обоснование рационального состава оборудования в целях снижения времени простоя рубительной машины и времени ожидания грузовика, что является задачей оптимизации производства с целью увеличения объема производства.

**Объекты и методы исследований.** Объектом исследования является возможность имитационного моделирования в современных графоаналитических пакетах технологического процесса производства щепы на лесосеке при помощи мобильной рубительной машины. Имитационная модель строилась в среде пакета *AnyLogic* [14].

*AnyLogic* поддерживает дискретно-событийное, агентное моделирование и системную динамику, позволяет, используя стандартные механизмы приложения и язык *Java*, строить и анализировать работу различных моделей, в том числе и моделей технологических процессов. В исследовании применялось моделирование в виде сочетания дискретно-событийного и агентного методов.

Практическое применение материалов исследования позволит на основе разработанной модели совершенствовать технологический процесс производства щепы на лесосеке на основе передвижных рубительных машин.

**Результаты и их обсуждение.** Местом действия имитационной модели является территория лесосеки заданных размеров. Были приняты размеры лесосеки 500×800 м, площадь 40 га. Модель предусматривает наличие куч лесосечных отходов, рубительной и транспортной машин. В процессе разработки модели рассматривалась работа двух машин, находящихся в технологической связи и работающих на территории лесосеки. Подразумевалось, что переработке на щепу подлежат лесосечные отходы, находящиеся на лесосеке в виде куч. В качестве машины измельчения применена передвижная рубительная машина на базе трактора. Рубительная машина в разработанной модели перемещается от одной кучи лесосечных отходов — к другой, выполняя измельчение отходов на щепу с ее загрузкой в кузов транспортной машины. Рубительная машина в процессе своей работы взаимодействует с транспортной машиной, которая производит перевозку щепы от места выработки до склада хранения, находящегося в определенном месте на лесосеке. При заполнении кузова транспортной машины рубительная машина останавливается и ожидает прибытия транспортной машины. В качестве изменяемых факторов

выступают число куч отходов, подлежащих переработке, грузовой вместимость транспортной машины. Варьирование факторов предусмотрено в виде подвижных линейных ползунков-слайдеров (рис. 1). Число куч отходов может меняться по оси X от 5 до 20 шт., по оси Y — от 4 до 10 шт. Объем лесосечных отходов определяется путем перемножения числа куч на объем единичной кучи.

### Исходные данные

Площадь лесосеки: 40 га

Объем лесосечных отходов (куб.м): 100 куб.м



Рис. 1. Панель варьирования факторов

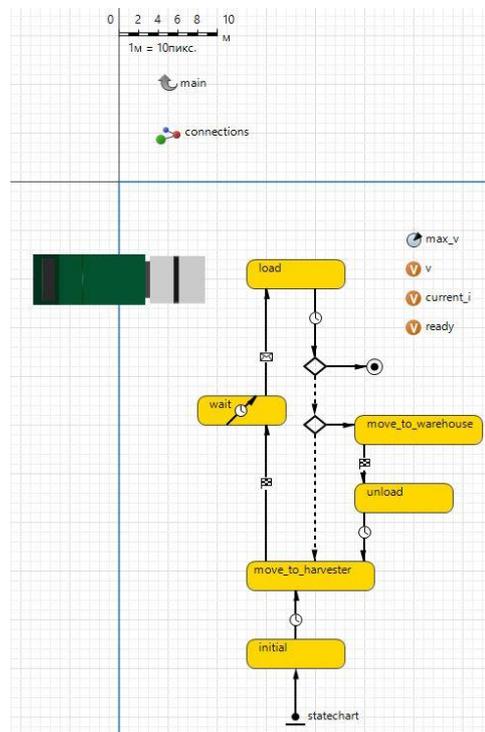
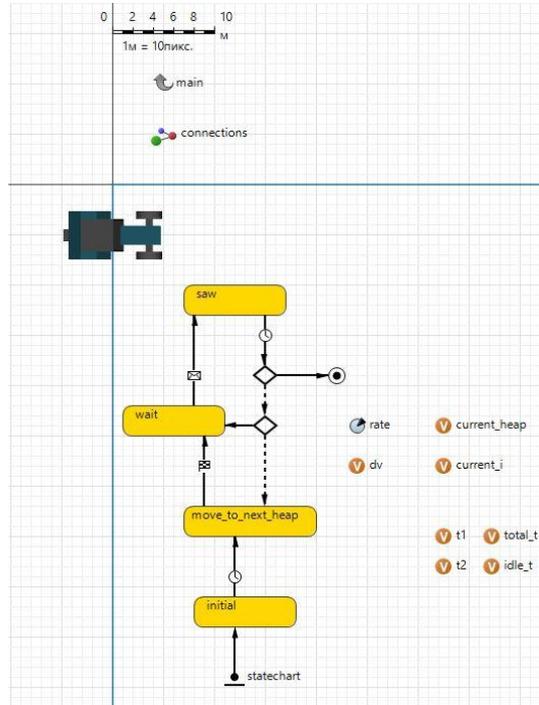
**Соглашения.** Площадь лесосеки — 40 га. На лесосеке находится определенный объем лесосечных отходов в виде куч. Средний объем одной кучи принят 1.7 м<sup>3</sup>. Время разгрузки транспортной машины на складе щепы занимает 5 мин. Из 1 м<sup>3</sup> лесосечных отходов получается 1.6 м<sup>3</sup> насыпной щепы. Скорость перемещения мобильной рубительной машины по лесосеке от кучи к куче лесосечных отходов — 3 км/ч. Скорость движения порожней транспортной машины — 5 км/ч, скорость с грузом — 2 км/ч. Значения скоростей движения рубительной и транспортной машин были приняты по аналогии с данными по работе сортиментных транспортных машин (форвардеров) [15].

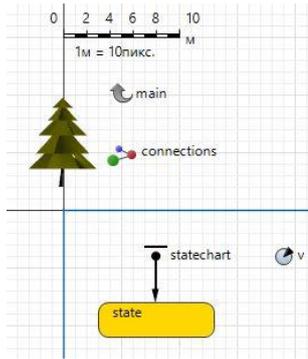
Максимальный объем загрузки транспортной машины — 10 м<sup>3</sup>. Производительность мобильной рубительной машины принята 1 м<sup>3</sup> в мин. Затраты на работу мобильной рубительной машины — 20 тыс. р. за смену 8 ч. Затраты на работу транспортной машины — 10 тыс. р. за смену 8 ч.

В рабочей части программы *AnyLogic Main* создавалась пространственная модель лесосеки прямоугольной формы с размерами 800×500 шт. Таким образом имитировалась лесосека прямоугольной формы, размерами 800×500 м, площадью 40 га. Масштабная линейка задавалась параметрами 1 м — 2 пикселя. На странице *Main* размещаются элемент «Склад» из палитры «Картинки» и элемент «Точечный узел» из палитры «Библиотека моделирования процессов». Точечному узлу присваивается имя *sklad*. В процессе работы модели на Склад будет транспортироваться полученная щепа.

Программа *AnyLogic* позволяет работать с анимированными моделями. При этом на территории лесосеки визуально появляются агенты моделирования, они перемещаются и взаимодействуют между собой. Имитационная модель работы передвижной рубительной машины является комбинированной агентно-дискретно-событийной моделью.

Конфигурация модели предусматривает три агента. Один агент — это предмет труда или куча щепы, *Heap*, два других агента — это техника, а именно передвижная рубительная машина — *Harvester*, транспортная машина — *Truck*. На рис. 2 показана диаграмма состояний агентов.





**Рис. 2.** Диаграмма состояний агентов (сверху вниз) *Harvester, Truck, Heap*

Переход между состояниями осуществляется при помощи операторов. Операторы: времени (заданного или с расчетного) , события , условия , достижения агентом точки назначения . Основные состояния агентов показаны в табл. 1.

**Таблица 1.** Состояние и взаимодействие агентов

| Состояние              | Поведение агента  | Действие  |
|------------------------|---|---|
| <i>Агент Harvester</i> |   |   |
| initial                | Начало работы рубительной машины  | <code>jumpTo(main.sklad);</code><br>//рубительная машина находится около склада<br><code>setSpeed(3, КРН);</code><br>//ее скорость 3 км/ч<br><code>t1 = time();</code><br>//засекаем время начала работы рубительной машины<br><code>current_i = 0;</code><br>//следующая куча отходов имеет номер 0  |
| transition1            | Переход из состояния <i>initial</i> в состояние <i>move_to_next_heap</i>                          | Тайм-аут 1 мин  |
| move_to_next_heap      | Машина рубительная перемещается к следующей куче отходов  | <code>moveTo(main.collection.get(current_i))</code>   |
| transition2            | Переход из состояния <i>move_to_next_heap</i> в состояние <i>wait</i>                             | По прибытию агента<br><code>current_heap = main.heaps.get(0);</code>  |
| wait                   | Простой. Ожидание прибытия транспортера щепы  | Действие при входе: <code>t2 = time();</code><br>//засекаем время начала простоя<br>Действие при выходе: <code>idle_t += time() - t2;</code><br>//конец простоя   |
| transition3            | Переход из состояния <i>wait</i> в состояние <i>cut</i>   | При получении сообщения Object (прибытие транспортера щепы, готовность измельчать)  |
| saw                    | Измельчение кучи отходов рубительной машиной (полностью или частично)                             | Действие при входе целиком или частично зависит от пустого места в транспортере щепы<br><code>dv = min(current_heap.v, (main.truck.max_v - main.truck.v)/1.6);</code><br><code>current_heap.v -= dv;</code><br>//куча уменьшилась. Действие при выходе:<br><code>if (current_heap.v == 0) {</code><br>//если куча отходов закончилась, то<br><code>main.remove_heaps(current_heap);</code><br>//удаляем кучу отходов из популяции<br><code>current_i++;}</code><br>//и переходим к следующей куче отходов<br><code>send(current_i, main.truck);</code><br>//рубительная машина сообщает транспортеру, где она находится |
| transition4            | Переход из состояния <i>saw</i> в 1-й блок ветвления  | Задержка в состоянии <i>cut</i> зависит от переработанного объема и скорости переработки, происходит по таймауту<br>Таймаут: <code>dv * rate</code> мин   |
| transition5            | Переход из 1-го блока ветвления в конечное состояние  | Срабатывает, если выполняется условие: <code>current_i == main.n</code><br>//последняя куча переработана?<br>Действие: <code>total_t = time() - t1;</code><br>//конец работы  |
| transition6            | Переход из 1-го блока ветвления во 2-й блок ветвления (если еще остались кучи лесосечных отходов) | Условие «по умолчанию» (выбирается, если все остальные условия не выполняются)  |

| Состояние          | Поведение агента  | Действие   |
|--------------------|---|--|
| transition7        | Переход из 2-го блока ветвления в состояние <i>wait</i> (если куча отходов переработана не полностью, рубительная машина стоит и ждет возвращения транспортера щепы)  | Срабатывает при выполнении условия.<br>Условие: <code>current_heap.v &gt; 0</code>   |
| transition8        | Переход из 2-го блока ветвления в состояние <i>move_to_next_heap</i> (если куча переработана полностью, то рубительная машина поедет дальше)                          | По умолчанию (выбирается, если все остальные условия не выполняются)   |
| finalState         | Конечное состояние  | Действие: <code>moveTo(main.sklad);</code><br>//рубительная машина возвращается на склад   |
| <i>Агент Truck</i> |   |  |
| initial            | Начало работы транспортера щепы   | Действие при входе:<br><code>jumpTo(main.sklad);</code><br>//транспортер щепы находится около склада<br><code>setSpeed(5, КРН);</code><br>//его скорость 5 км/ч<br><code>current_i = 0;</code><br>//следующая куча имеет номер 0 |
| transition1        | Переход из состояния <i>initial</i> в состояние <i>move_to_next_heap</i>  | Тайм-аут 1 мин   |
| move_to_cutter     | Транспортер щепы перемещается к рубительной машине  | Действие при входе: <code>moveTo(main.collection.get(current_i));</code>   |
| transition2        | Переход из состояния <i>move_to_next_cutter</i> в состояние <i>wait</i>   | По прибытию агента (транспортер щепы прибыл и сигнализирует рубительной машине)  |
| wait               | –   | Действие при входе: <code>send("Ready!", main.cutter);</code>  |
| transition3        | Переход из состояния <i>wait</i> в состояние <i>wait</i> (если рубительная машина подъехала к куче позже транспортера, транспортер ждет и продолжает сигнализировать) | Происходит: по таймауту<br>Таймаут: 0.25 мин<br>Действие: <code>send("Ready!", main.cutter)</code>   |
| transition4        | Переход из состояния <i>wait</i> в состояние <i>load</i><br>Транспортер щепы получает от рубительной машины сообщение, у какой кучи она будет его ждать               | Происходит: при получении сообщения<br>Тип сообщения: <code>int</code><br>Действие: <code>current_i = msg</code>   |
| load               | Загрузка транспортера щепы  | Состояние: загрузка транспортера щепы, его скорость = 2 км/ч<br>Действие при входе: <code>v += main.cutter.dv * 1.6;</code><br><code>setSpeed(2, КРН)</code>   |
| transition5        | Переход из состояния <i>load</i> в 1-й блок ветвления   | Происходит: по таймауту<br>Таймаут: 0.25 мин   |
| transition6        | Переход из 1-го блока ветвления в конечное состояние (если последняя куча переработана, то конец работы)  | Срабатывает при выполнении условия.<br>Условие: <code>current_i == main.n</code>   |
| transition7        | Переход из 1-го блока ветвления во 2-й блок ветвления (еще не окончание работы)   | По умолчанию (выбирается, если все остальные условия не выполняются)   |
| transition8        | Переход из 2-го блока ветвления в состояние <i>move_to_warehouse</i> (если объем транспортера заполнен, то он поедет на склад для разгрузки)                          | Срабатывает при выполнении условия.<br>Условие: <code>v &gt;= max_v</code>   |
| transition9        | Переход из 2-го блока ветвления в состояние <i>move_to_cutter</i> (если объем транспортера не наполнился, то он поедет дальше за рубительной машиной)                 | По умолчанию (выбирается, если все остальные условия не выполняются)   |
| move_to_warehouse  | Состояние транспортер щепы: едет на склад.<br>Действие при входе: <code>moveTo(main.sklad);</code>  | Действие при входе:<br><code>moveTo(main.sklad)</code>   |
| transition10       | Переход из состояния <i>move_to_warehouse</i> в состояние <i>unload</i>   | По прибытию агента   |
| unload             | Разгрузка транспортера щепы   | Состояние: разгрузка транспортера щепы, его скорость = 5 км/ч<br>Действие при входе: <code>v = 0;</code><br><code>setSpeed(5, КРН)</code>  |
| transition11       | Переход из состояния <i>unload</i> в состояние <i>move_to_cutter</i>  | Происходит: по таймауту<br>Таймаут: 5 мин (принятая по условию время разгрузки транспортера)   |

| Состояние  | Поведение агента   | Действие  |
|------------|--------------------|---|
|            |                    | занимает 5 мин  |
| finalState | Конечное состояние | Транспортер щепы возвращается на склад.<br>moveTo(main.sklad) |

Для наглядности отображения результатов работы модели на страницу *Main* поместим элементы «Круговая диаграмма» и «Столбчатая диаграмма» из

палитры «Статистика». При работе модели круговая и столбчатая диаграмма неактивны (рис. 3), становясь видимыми в момент окончания работы модели (рис. 4).

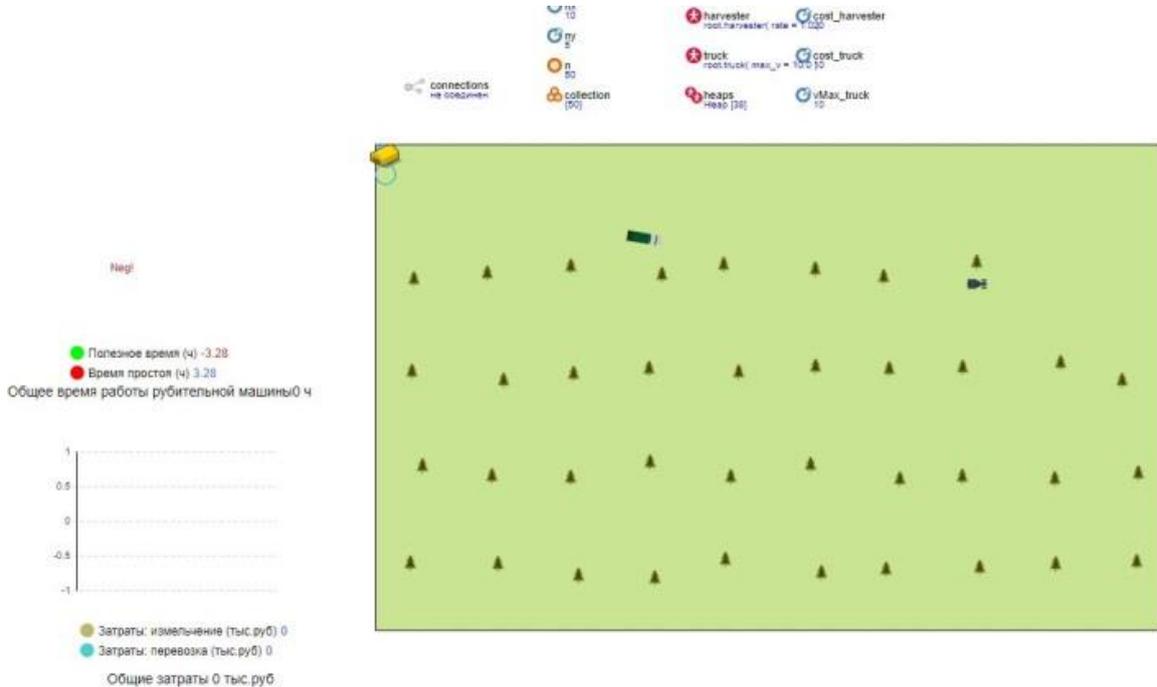


Рис. 3. Момент работы имитационной модели (порожний транспортер движется к рубильной машине)

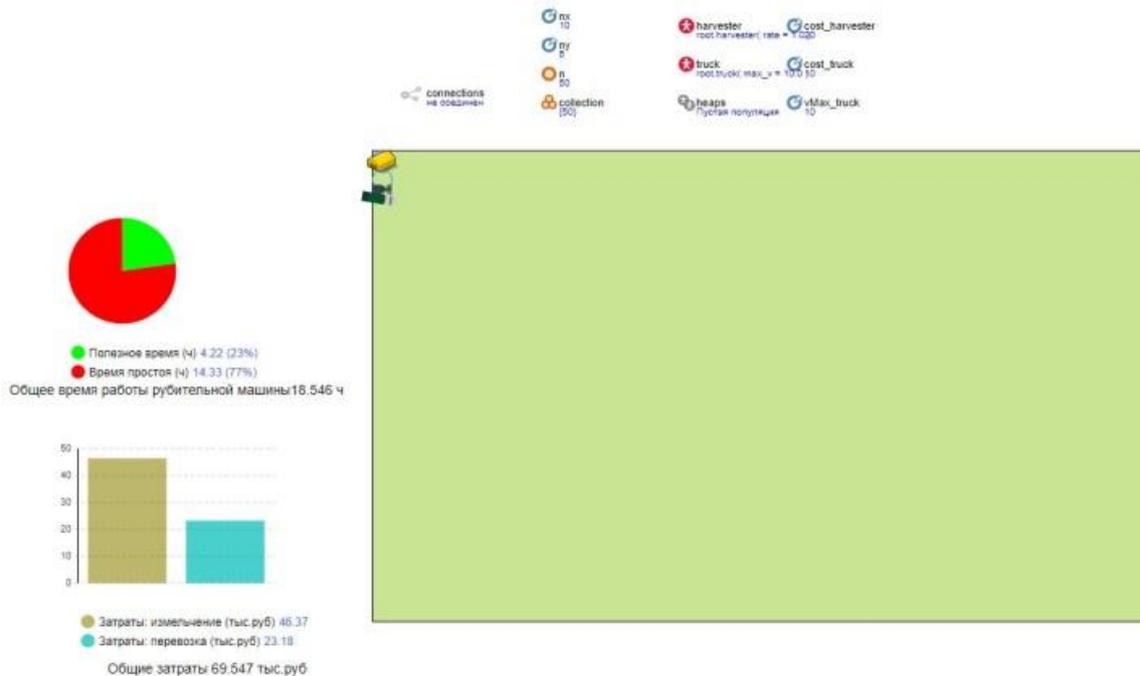


Рис. 4. Момент завершения работы имитационной модели

В процессе работы модели отмечаются состояние агентов, моменты перехода, время нахождения в том или ином состоянии. С определенной натяжкой модель можно

назвать «цифровым двойником» реального процесса измельчения лесосечных отходов мобильной рубильной машиной. Анимационные инструменты

*AnyLogic* дают возможность визуально наблюдать движение машин-агентов по территории лесосеки. Используя модель, можно проводить анализ эффективности процесса при получении числовых данных относительно работы и простоев машин, их производительности, взаимного влияния длительности операций каждой машины на технологический процесс в целом.

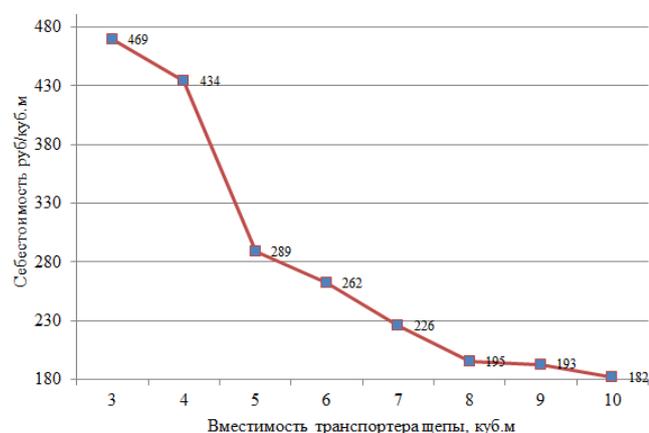
Для примера проведем моделирование ситуации, связанной с изменением вместимости транспортера

щепы. Принимаем условие, согласно которому разрабатывается лесосека с числом куч лесосечных отходов — 8 (по оси X) и 4 (по оси Y), всего на лесосеке сосредоточено 160 м<sup>3</sup> лесосечных отходов. Из этого объема (в плотной мере) планируется получение 256 м<sup>3</sup> щепы насыпной плотности. Вместимость грузового пространства транспортера щепы будем изменять от 3 до 10 м<sup>3</sup> с шагом 1 м<sup>3</sup>. Результаты представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты моделирования

| Вместимость транспортера щепы, м <sup>3</sup> | Время работы рубительной машины, ч (%) | Время простоя рубительной машины, ч (%) | Расходы на измельчение, тыс. р. | Расходы на транспортировку щепы, тыс. р. | Расходы, итого, тыс. р. | Себестоимость измельчения, р./м <sup>3</sup> |
|---|--|---|---------------------------------|--|-------------------------|--|
| 3   | 2,77 (9)                               | 29,31 (91)                              | 80,19                           | 40,09                                    | 120,3                   | 469  |
| 4   | 2,56 (11)                              | 20,81 (89)                              | 58,44                           | 29,22                                    | 87,7                    | 343  |
| 5   | 2,65 (13)                              | 17,19 (87)                              | 49,6                            | 24,8                                     | 74,4                    | 289  |
| 6   | 2,8 (16)                               | 15,14 (84)                              | 44,84                           | 22,42                                    | 67,25                   | 262  |
| 7   | 2,66 (17)                              | 12,55 (83)                              | 38,01                           | 19                                       | 57,01                   | 226  |
| 8   | 2,7 (20)                               | 10,6 (80)                               | 33,27                           | 16,64                                    | 49,9                    | 195  |
| 9   | 2,68 (21)                              | 9,98 (79)                               | 31,65                           | 15,82                                    | 47,47                   | 183  |
| 10  | 2,83 (23)                              | 9,6 (77)                                | 31,06                           | 15,53                                    | 46,6                    | 182  |

Для лучшей наглядности покажем зависимость себестоимости измельчения от вместимости транспортера щепы в виде графика (рис. 5)



**Рис. 5.** Зависимость себестоимости измельчения от вместимости транспортера щепы

Исходя из полученных данных, очевидно, что передвижная рубительная машина как наиболее дорогостоящий вид оборудования должна быть максимально загружена, и время ее простоев следует сводить к минимуму. Даже при применении транспортера щепы максимальной грузовой вместимости 10 м<sup>3</sup> передвижная рубительная машина простаивает 77 % полезного времени. Понятно, что какое-то время неизбежно будет теряться на переезд машины от одной кучи лесосечных отходов к другой, но потери все-таки слишком велики. Следовательно, в комплекте с передвижной рубительной машиной, работающей непосредственно на деляне, должны работать два и более транспортера щепы. Оптимальной грузовой вместимостью транспортера следует считать величину 5...7 м<sup>3</sup>. При увеличении грузовой вместимости с 3 до 5

м<sup>3</sup> происходит снижение себестоимости в 1,62 раза. Тогда как при увеличении грузовой вместимости с 8 до 10 м<sup>3</sup> происходит снижение себестоимости всего в 1,07 раза при существенном увеличении габаритных размеров транспортера и снижении проходимости.

Следующим этапом в моделировании процесса работы мобильных рубительных машин будут подбор и обоснование исходных данных, опирающихся на опыт применения конкретных марок и моделей машин в определенных лесозаготовительных условиях, их верификация с данными других исследователей и параметрами заводов-изготовителей. Эти действия позволят повысить степень достоверности модели. Отдельные алгоритмы, переходы, взаимодействия агентов могут корректироваться и уточняться. Фиксированные числовые показатели могут быть заменены зависимостями величин, формулами, описывающими корреляцию между отдельными показателями.

**Заключение.** Разработанная в графо-аналитическом пакете программ *AnyLogic* модель технологического процесса производства щепы на лесосеке на основе мобильной рубительной машины позволяет проводить имитационное моделирование процесса при изменении ряда факторов. В качестве достоинств разработанной модели можно перечислить:

- возможность моделирования лесосек различного размера с индивидуальными показателями запаса и дислокации лесосечных отходов;
- возможность варьирования в широких пределах технологических показателей оборудования;
- возможность фиксации и последующего рассмотрения большого числа параметров технологического оборудования и предмета труда;
- доступное анимационное представление работы оборудования;

– возможность развития и расширения модели, замены фиксированных числовых показателей зависимостями и соотношениями.

Дальнейшее применение разработанной модели заключается в постановке серии имитационных

экспериментов в целях последующего анализа результатов работы, значений определяющих целевых функций при изменении лесозаготовительных и технологических показателей.

### Литература

1. European Commission the European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions; European Commission: Brussels, Belgium, 2019. P. 1-30.
2. Coyette H., Schenk C. Agriculture, Forestry and Fishery Statistics, 2019th ed.; Cook, E., Ed.; Eurostat: Luxembourg, 2019.
3. Yoshida M., Fujiwara M., Sakai H., Ivetić V., Stankovićeditors D. 20173097272, English, Conference paper, Serbia, 9788691886110, Belgrade, International Conference: Reforestation Challenges, Belgrade, Serbia (3-6 June 2015). Proceedings. P. 211-216. REFORESTA, a proposal of a site preparation system combined with chipping operation, 2015.
4. Леонов Е.А. Устойчивое снабжение энергообъектов древесным топливом с созданием минимально необходимых запасов // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая пром-сть. 2014. № 2. С. 17-19.
5. Леонов Е.А., Федоренчик А.С. Имитационное моделирование устойчивого функционирования склада древесного топлива // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая пром-сть. 2012. № 2. С. 58-61.
6. Мохирев А.П., Рукомойников К.П., Герасимов М.М. Технологический алгоритм производства продукции из порубочных остатков // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2023. № 1 (391). С. 153-171.
7. Долматов С.Н., Колесников П.Г. Исследование тепловой эффективности ограждающих конструкций из древесно-цементных композитов // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39, № 4. С. 294-299.
8. Hytonen J., Moilanen M. Effect of harvesting method on the amount of logging residues in the thinning of Scots pine stands. Biomass Bioenergy. 2014. 67. P. 347-353.
9. Spinelli R., Eliasson L., Han H.S. A Critical Review of Comminution Technology and Operational Logistics of Wood Chips. Curr. For. Rep. 2020. 6. P. 210-219.
10. Соколов А.П. Имитационное моделирование процессов заготовки древесины // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2023. № 245. С. 244-260.
11. Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера // Лесной вестн. Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 3. С. 69-80.
12. Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А. Компьютерная симуляция разработки лесосек с использованием валочно-сучкорезно-раскряжевых машин // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 108-113.
13. Enkawa T. Gendai Operations Management - IoT Jidai no Hinshitsu, Seisansei Koujyo to Kokyaku Kachi Souzou [Modern Operations Management, Improvement of Quality and Productivity for Customers Value in the Era of IoT]. Asakura Shoten: Tokyo, Japan, 2017.
14. Официальный сайт компании «The AnyLogic Company» - производителя инструментов и бизнес-приложений имитационного моделирования [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anylogic.ru> (дата обращения: 14.03.2024).
15. Manner J. Automatic and experimental methods to studying forwarding work. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Acta Universitatis agriculturae Sueciae, 2015. 71 p.

### References

1. European Commission the European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions; European Commission: Brussels, Belgium, 2019. P. 1-30.
2. Coyette H., Schenk C. Agriculture, Forestry and Fishery Statistics, 2019th ed.; Cook, E., Ed.; Eurostat: Luxembourg, 2019.
3. Yoshida M., Fujiwara M., Sakai H., Ivetić V., Stankovićeditors D. 20173097272, English, Conference paper, Serbia, 9788691886110, Belgrade, International Conference: Reforestation Challenges, Belgrade, Serbia (3-6 June 2015). Proceedings. P. 211-216. REFORESTA, a proposal of a site preparation system combined with chipping operation, 2015.
4. Leonov E.A. Sustainable supply of energy facilities with wood fuel with the creation of minimum necessary reserves // Trudy BGTU. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya prom-st'. 2014. № 2. P. 17-19.
5. Leonov E.A., Fedorenchik A.S. Simulation modeling of sustainable operation of a wood fuel warehouse // Trudy BGTU. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya prom-st'. 2012. № 2. P. 58-61.
6. Mohirev A.P., Rukomojnikov K.P., Gerasimov M.M. Technological algorithm for the production of products from felling residues // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2023. № 1 (391). P. 153-171.
7. Dolmatov S.N., Kolesnikov P.G. Investigation of the thermal efficiency of enclosing structures made of wood-cement composites // Conifers of the boreal area. 2021. V. 39, № 4. P. 294-299.
8. Hytonen J., Moilanen M. Effect of harvesting method on the amount of logging residues in the thinning of Scots pine stands. Biomass Bioenergy. 2014. 67. P. 347-353.
9. Spinelli R., Eliasson L., Han H.S. A Critical Review of Comminution Technology and Operational Logistics of Wood Chips. Curr. For. Rep. 2020. 6. P. 210-219.
10. Sokolov A.P. Simulation modeling of wood harvesting processes // Izvestia SPbLTA. 2023. № 245. P. 244-260.
11. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A. Simulation modeling of the technological process of harvesting wood on the example of a forest harvester // Lesnoj vestn. Forestry Bulletin. 2023. V. 27, № 3. P. 69-80.
12. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A. Computer simulation of the development of cutting areas using felling, knot-cutting and bucking machines // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 2 (54). P. 108-113.
13. Enkawa T. Gendai Operations Management - IoT Jidai no Hinshitsu, Seisansei Koujyo to Kokyaku Kachi Souzou [Modern Operations Management, Improvement of Quality and Productivity for Customers Value in the Era of IoT]. Asakura Shoten: Tokyo, Japan, 2017.
14. The official website of The AnyLogic Company, a manufacturer of simulation tools and business applications [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.anylogic.ru> (data obrashcheniya: 14.03.2024).
15. Manner J. Automatic and experimental methods to studying forwarding work. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Acta Universitatis agriculturae Sueciae, 2015. 71 p.