

Обоснование технологии работы мобильных рубильных машин средствами имитационного моделирования на платформе AnyLogic

С.Н. Долматов^{1а}, Т.С. Бабкина^{2б}, В.В. Побединский^{3с}

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва. Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Российская Федерация, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/20

³ Уральский государственный лесотехнический университет. Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37

^а pipinaskus@mail.ru, ^б ttabkina@mail.ru, ^с pobedinskyvv@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>, ^б orcid.org/0000-0003-2892-8831, ^с orcid.org/0000-0001-6318-3447

Статья поступила 12.01.2026, принята 18.02.2026

Комплексная переработка древесных ресурсов – это современная тенденция, характерная для большинства развитых стран. Утилизация вторичных древесных ресурсов путём их измельчения на щепу с последующим производством из этого сырья продукции высокой степени передела является эффективным решением вовлечения в промышленную переработку ранее неиспользованных ресурсов. В работе рассмотрен вопрос моделирования технологического процесса производства щепы из лесосечных отходов посредством применения мобильных рубильных машин. Целью исследования являлась разработка имитационной модели, предназначенной для расчётов технологических и экономических показателей процесса производства щепы мобильными рубильными машинами в расчёте на определение целесообразности применения одного из вариантов технологии мобильных рубильных машин, а также оценку влияния различных факторов на эффективность процесса переработки лесосечных отходов на щепу. Актуальность разработки имитационной модели обусловлена рядом преимуществ современных графоаналитических САЕ пакетов программ, а также ограничениями, связанными с возможностью и экономической целесообразностью натурного физического эксперимента с реальными машинами. Имитационная модель была разработана в САЕ пакете AnyLogic. В исследовании применялось моделирование в виде сочетания дискретно-событийного и агентного методов. Модель работает на основе взаимодействия агентов, действующих по соответствующим правилам в среде, представляющей собой модель лесосеки. Описан алгоритм взаимодействия агентов и предмета труда. Модель позволяет изменять значительное число входных показателей с фиксацией отклика и получением технологических и экономических данных. В результате исследования в соответствии с задачами работы, в программе AnyLogic были разработаны имитационные модели трёх вариантов технологии мобильных рубильных машин. На основе этих моделей было проведено факторное планирование и имитационный эксперимент, получены числовые и графические данные. 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. Практическое применение материалов исследования позволит совершенствовать технологический процесс производства щепы на лесосеке на основе передвижных рубильных машин.

Ключевые слова: лесосечные отходы; щепка; имитационное моделирование; факторное планирование; технология; агент; Anylogic.

Substantiation of the operation technology of mobile chipping machines using simulation modeling on the AnyLogic platform

S.N. Dolmatov^{1а}, T.S. Babkina^{2б}, V.V. Pobedinsky^{3с}

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Prospect, Krasnoyarsk, Russia

² National Research University, Higher School of Economics; 25/12, Bolshaya Pecherskaya St., Nizhniy Novgorod, Russia

³ Ural State Forestry University; 37, Sibirsky Tract, Ekaterinburg, Russia

^а pipinaskus@mail.ru, ^б ttabkina@mail.ru, ^с pobedinskyvv@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>, ^б orcid.org/0000-0003-2892-8831, ^с orcid.org/0000-0001-6318-3447

Received 12.01.2026, accepted 18.02.2026

The integrated processing of wood resources is a modern trend characteristic of most developed countries. Utilizing secondary wood resources by chipping them and then producing highly value-added products from this raw material is an effective solution for integrating previously unused resources into industrial processing. The paper examines the modeling of the technological process for producing chips from logging residues using mobile chippers. The aim of the study is to develop a simulation model for calculating the technological and economic indicators of the chip production process using mobile chippers, with a view to determining the feasibility of using one of the mobile chipper technology options, as well as to assess the impact of various factors on the efficiency of the logging residue chipping

process. The relevance of developing a simulation model is due to several advantages of modern graph-analytical CAE software packages, as well as limitations associated with the feasibility and economic feasibility of full-scale physical experiments with real machines. The simulation model has been developed in the AnyLogic CAE package. The study utilizes a combination of discrete-event and agent-based modeling. The model operates on the interaction of agents acting according to appropriate rules in a model logging site. An algorithm for interaction between agents and the workpiece is described. The model allows for changing a significant number of input parameters, recording the response and obtaining technological and economic data. As a result of the study, simulation models of three mobile chipper technology options have been developed in Anylogic software in accordance with the objectives of the study. Based on these models, factorial planning and a simulation experiment have been conducted, yielding numerical and graphical data. The simulation experiment allows for assessing the influence of various factors on performance targets, utilization, and production costs. The results of this study can be used to improve logging site clearing technologies and to inform decision-making on the composition and combination of process equipment required for chip production in logging sites. Practical application of the research materials allows for improvements in the technological process of chip production in logging sites using mobile chippers.

Keywords: logging waste; wood chips; simulation modeling; factorial planning; technology; agent; Anylogic.

Введение. В настоящее время в условиях формирования направлений и экологических стратегий [1, 2, 3], акцентирующих внимание на необходимость повышения уровня жизни, бережного отношения к природным ресурсам и их рационального использования, особенно актуальной становится задача повышения эффективности лесопользования, в частности совершенствования технологии переработки вторичных древесных ресурсов. Определяющую роль в данном контексте играет возможность комплексного использования древесных ресурсов, которое предполагает не только заготовку древесины, но и последующую переработку неликвидной, низкосортной древесины, вовлечение в дальнейшую переработку отходов лесозаготовки и деревопереработки. Решение вопроса утилизации низкокачественной древесины и отходов в РФ может и должно производиться на основе реализации сравнительно недорогой технологии производства щепы как основного полуфабриката, необходимого для выпуска широчайшей номенклатуры готовой продукции высокого уровня передела [4].

В работе [5] было обосновано, что критическим расстройством, определяющим возможность эффективной переработки древесного сырья на щепу с возможностью её дальнейшего использования стационарным оборудованием нижнего склада, является удалённость в 70 км. Реальные условия удалённости лесосек от крупных центров переработки древесного сырья составляют для условий Сибири и Дальнего Востока не менее 100–150 км и доходят до 250–300 км [6]. Поэтому обоснование технологии транспорта щепы следует вести исключительно из условия транспортировки непосредственно щепы, но не сырья, необходимого для её производства.

Для обеспечения эффективного применения технологического оборудования для производства измельчённой древесины необходимо решение задачи определения рационального местоположения и сочетания отдельных этапов технологии, машин, места и способа их применения. При этом имеет место ряд случайных факторов, неопределённостей как природно-технологического, так и субъективного характера, а также влияние человеческого фактора. Реальный натурный опыт будет самым точным и достоверным механизмом получения информации о преимуществах и недостатках оборудования и технологий в конкретных условиях их применения. Но это самый дорогой и длительный процесс, часто производственный эксперимент просто невозможен в силу различных причин. Современные средства имитационной симуляции в компьютерных пакетах программ – это доступное и высокоэффективное решение, которое дает возможность учесть в разрабатываемой имитационной модели большое число факторов, существенно влияющих на результаты работы отдельных машин и технологического процесса в целом. Разработка систем компьютерного моделирования функционирования лесных машин является современной тенденцией, позволяющей учитывать влияние различных, в том числе случайных факторов взаимодействия оборудования, предмета труда, внешней среды. Известны примеры успешного применения системы AnyLogic для моделирования технологического процесса работы харвестеров и форвардеров [7–10]. В работе [11] проводилось обоснование рационального состава оборудования в целях снижения времени простоя рубильной машины и времени ожидания грузовика, что является задачей оптимизации производства с целью увеличения объёма производства. В работе [12] нами была разработана имитационная модель работы мобильной рубильной машины в программе Anylogic. Это была модель в которой мобильная рубильная машина, находясь на лесосеке, перемещалась от одной кучи отходов – к другой, а транспортировку щепы на склад осуществлял транспортёр.

В настоящем исследовании рассмотрены три варианта сценария применения мобильных рубильных машин:

- рубильная машина размещается на базовом самоходном шасси, например, на тракторе, а в сцепке с ним прицеп-щеповоз или прицеп с контейнерами для сбора вырабатываемой щепы;
- рубильная машина находится в сцепке с самоходным шасси или является составной частью машины, а на нём размещается ёмкость (кузов или контейнеры) для сбора щепы;
- рубильная машина находится на территории погрузочной площадки, работая сразу на склад щепы, а сырьё, подлежащее переработке, собирается на лесосеке и подвозится вспомогательной машиной.

До недавнего времени существовало устойчивое мнение, что из-за захламлённости и неудовлетворительных почвенно-грунтовых условий на освоенных лесосечных массивах мобильность рубильных машин будет крайне затруднена, а в большинстве случаев невозможна. Считается, что технологическая схема передвижной установки в режиме самоподбора отходов на лесосеке и одновременной переработки их на щепу хотя

и требует минимум машин, достаточно трудно реализуема. Однако известен успешный опыт применения машин серии Axsel AX 9045, сочетающих трактор – тягач, модуль с рубильной машиной, гидроманипулятором и клещевым захватом и кузовом. Причём кузов выполнен в самосвальном исполнении, позволяющий провести выгрузку щепы за 30–40 секунд.

В общем виде возможна реализация всех трёх сценариев. Очевидно, что максимальная производительность рубильной машины будет достигаться при 100 % использовании времени смены на измельчение, т. е. при работе с заранее сконцентрированными запасами древесины, подлежащей измельчению. Однако специфика работы лесозаготовительных бригад, когда лесозаготовка проводится в сезон – в зимнее время, а очистка лесосек – со сходом снежного покрова делает такую схему работы достаточно редкой.

Формализуем цель работы и обозначим основные задачи исследования.

Цель исследования – определение целесообразности применения одного из вариантов технологии мобильных рубильных машин, а также оценка влияния различных факторов на эффективность процесса переработки лесосечных отходов на щепу.

Задачи исследования. В программе Anylogic разработать имитационные модели трёх вариантов технологии мобильных рубильных машин.

1. Провести факторное планирование и имитационный эксперимент, получить числовые и графические данные.

Объект, предмет и методы исследований. Объектом исследования является технологический процесс переработки вторичных древесных ресурсов путём производства щепы мобильными рубильными машинами. Предмет исследования – закономерности переработки вторичных древесных ресурсов на щепу с учётом лесосырьевой базы, технологии производства, лесотранспортной сети, примененияемого оборудования, его местоположения и режима работы.

Методы исследования: системный анализ и синтез, теория факторного эксперимента, регрессионного анализа, имитационное моделирование, в графоаналитических пакетах прикладных программ AnyLogic и Statistica.

Результаты и их обсуждение. В исследовании применялось моделирование в виде сочетания дискретно-событийного и агентного метода [12]. Имитационная модель строилась в среде графоаналитического пакета AnyLogic [13]. 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. Было разработано три варианта имитационной модели процесса производства щепы на лесосеке. Применение рубильных передвижных установок было реализовано по трём принципиальным технологическим схемам:

– передвижная рубильная установка, перемещаясь по лесосеке, производит самоподбор имеющихся отхо-

дов и переработку их на щепу с одновременным сбором её в самоходный транспортный модуль (например, трактор с прицепом) с самосвальным кузовом. Когда самосвальный кузов наполняется, транспортный модуль следует на склад для выгрузки щепы. Модель была названа *harvesting_M-1*;

– передвижная рубильная установка находится на погрузочной площадке, производит выработку щепы из лесосечных отходов, доставка которых с лесосеки и подвозка на погрузочную площадку осуществляется самоходным транспортным модулем с гидроманипулятором (например, форвардером). Модель была названа *harvesting_S-1*;

– передвижная рубильная установка, перемещаясь по лесосеке, производит самоподбор имеющихся отходов и переработку их на щепу с одновременным сбором её в накопительную ёмкость. По мере наполнения ёмкости, машина следует на склад для выгрузки щепы. Модель была названа *harvesting_M-axsel 9045*.

Подробно устройство и работа модели рассмотрены в работе [12]. Имитационная модель выполнена в панели *main Anylogic* в виде макета лесосеки определённого размера, который можно изменять. Модель предусматривает наличие куч лесосечных отходов (агент *Heap*), рубильной (агент *Cutter*) и транспортной машин (агент *Truck*). Агенты находятся в тесной технологической связи между собой, перемещаются по лесосеке, реализуя заложенные правила и алгоритмы. Переработке на щепу подлежат кучи лесосечных отходов, количество которых также можно изменять. Для измельчения древесных отходов на щепу используется мобильная рубильная машина, которая либо перемещается от одной кучи отходов к другой, либо располагается стационарно на складе. Агент – рубильная машина взаимодействует либо с транспортёром отходов (стационарное положение машины), либо с транспортёром щепы, который перевозит продукцию от места измельчения до склада (агент *sklad* панели *Main*). В качестве изменяемых факторов выступают число куч отходов, подлежащих переработке, грузовая вместимость транспортной машины, скорость движения рубильной и транспортной машин.

На основе методики [12] было разработано ещё две имитационные модели. Модель *harvesting_S-1*, в которой рубильная машина неподвижна и находится на складе, а подвоз измельчаемой древесины производит транспортер. И модель *harvesting_M-axsel 9045*, основанная на применении комбинированной рубильно-сортировочной машины Axsel 9045, которая производит самоподбор имеющихся отходов и переработку их на щепу с одновременным сбором её в накопительную ёмкость. По мере наполнения ёмкости, машина следует на склад для выгрузки щепы.

Диаграммы состояния агентов в виде фрагмента рабочего пространства среды AnyLogic показаны на рис. 1, 2. Это агенты стационарной технологии (*harvesting_S-1*) и модели, где работает передвижной комплекс Axsel AX 9045 (*harvesting_M-axsel 9045*).

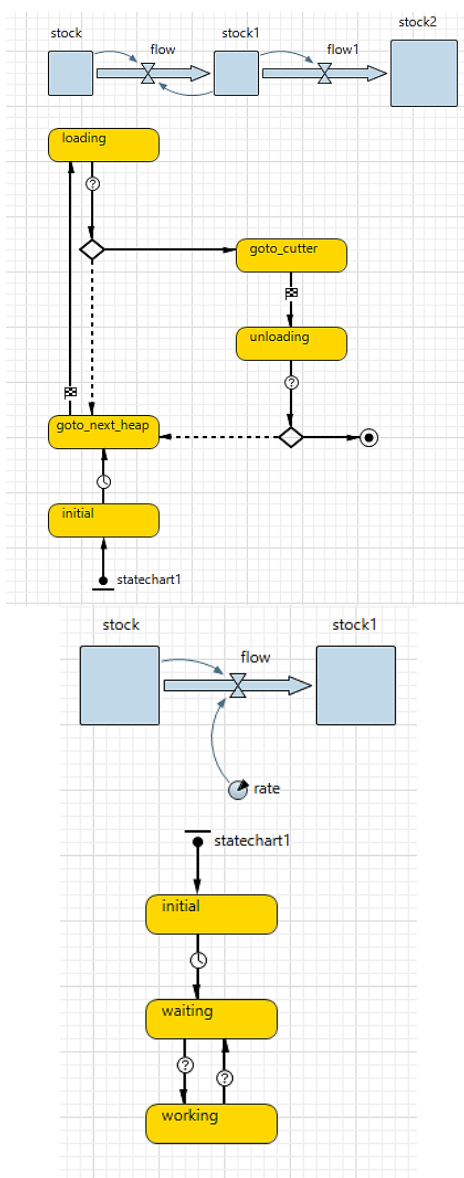


Рис. 1. Диаграммы состояний агентов Cutter и Truck модели harvesting_S-1

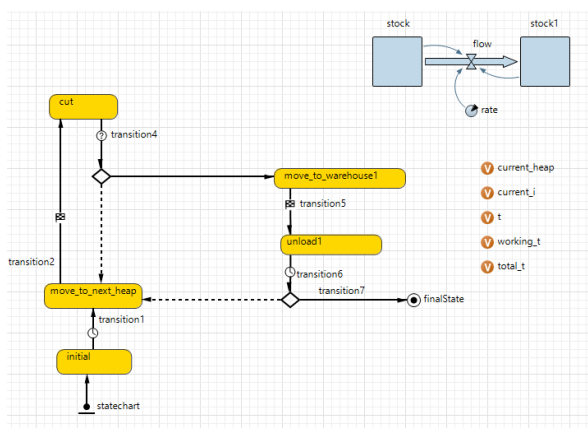


Рис. 2. Диаграммы состояний агента Cutter модели harvesting_M-axsel 9045

Значения скоростей движения рубильной и транспортной машин были приняты по аналогии с данными

по работе транспортных машин, движущихся в условиях лесосеки (сортиментные транспортные машины – форвардеры). Числовые данные приняты из работы [14].

Для оценки эффективности вариантов технологии проводились запуски трёх моделей для различных объёмов переработки с фиксированной ёмкостью транспорта в 10 м³, скоростью рубильной машины 3 км/ч и транспортера 5 км/ч. Поскольку Axsel-9045 – это комбинированная машина с гидроманипулятором, то по сравнению с базовой рубильной машиной содержание смены принято 40 тыс. руб., вместо 35 тыс. руб. Каждый режим подтверждался 10-кратным запуском модели, выводились средние величины показателей. Всего проведено 150 запусков моделей. Результаты показаны в виде табл. 1.

Таблица 1. Результаты работы моделей

Число куч отходов по оси X	Число куч отходов по оси Y	Объём древесных отходов, м ³	Время разработки лесосеки, час	% работы/проста рубильной машины	Объём полученной щепы, м ³	Себестоимость производства щепы, руб./м ³
модель harvesting_S-1						
10	5	85	7,45	38/62	258	197
12	6	122,4	10,4	39/61	371	191
14	7	166,6	15,1	39/61	505	204
16	8	217,6	18,5	40/60	659	192
18	9	275,4	24,6	40/60	835	202
модель harvesting_M-1						
10	5	85	6,5	44/56	258	175
12	6	122,4	9,35	44/56	371	173
14	7	166,6	14,1	43/57	505	191
16	8	217,6	16,3	45/55	659	170
18	9	275,4	21,9	45/55	835	180
модель harvesting_M-axsel 9045						
10	5	85	10,14	33/67	258	198
12	6	122,4	14,02	35/65	371	189
14	7	166,6	24,5	35/65	505	186
16	8	217,6	23,9	36/64	659	182
18	9	275,4	32,2	36/64	835	193

Интерпретируем полученные данные согласно табл. 1. Самая низкая себестоимость производства щепы получена при работе модели harvesting_M-1. Для этой же модели характерно минимальное время обработки лесосеки. Модель harvesting_M-axsel 9045 занимает второе место по минимальному времени освоения лесосеки. Самой дорогой оказалась щепы, производимая по технологии имитационной модели harvesting_S-1. Однако время освоения лесосеки при работе модели harvesting_S-1 существенно меньше, чем у модели harvesting_M-axsel 9045. При работе моделей harvesting_M-1 и harvesting_S-1 задействованы две машины – это рубильная машина и транспортер либо древесных отходов, либо щепы. Модель harvesting_M-axsel 9045 работает на основе одной комбинированной рубильно-транспортной модели. Работа подборщика лесосечных отходов (например, форвардера с расширенной грузовой платформой) состоит из технологических операций сбора отходов гидроманипулятором,

загрузки их в грузовое пространство, перевозки и также разгрузки гидроманипулятором на складе перед рубильной машиной. Затем уже оператор рубильной машины гидроманипулятором подаёт отходы в загрузочный патрон машины. То есть низкокачественная древесина перекладывается гидроманипуляторами дважды. В имитационных моделях *harvesting M-1* и *harvesting M-axsel 9045* лесосечные отходы собирает непосредственно гидроманипулятор мобильной рубильной машины. А дальнейшие технологические операции по перемещению предмета труда производятся уже со щепой, которая более однородна и технологична. Разгрузка щепы легко осуществляется самосвальными кузовами. Поэтому схемы работы моделей *harvesting M-1* и *harvesting M-axsel 9045* более предпочтительны. Технология модели *harvesting M-1* в плане удельных затрат на единицу выпуска щепы более выгодна, чем *harvesting M-axsel 9045*. Однако для *harvesting M-1* нужно две машины и два оператора. Даже ориентируясь на самые доступные машины на нашем рынке, а это (рубильная машина Амкордор 2904 и форвардер Амкордор 2641, комплект из двух машин стоит не менее 48 млн руб. Комбинированная машина Axsel 9045 одна, требуется один оператор и капиталовложения не превысят 27 млн руб. При этом требуется времени больше в среднем на 44 %. Учитывая тот факт, что Axsel 9045 – это в принципе самодостаточная машина и технология, не работающая в комплексе с какими-либо другими машинами, можно считать увеличение времени освоения лесосеки несущественным, а гораздо более важным – снижения финансового порога вхождения в технологию. Дальнейшие манипуляции будем проводить на основе работы имитационной модели *harvesting M-axsel 9045*.

На основе модели был проведён имитационный эксперимент. Для его проведения был составлен трёхфакторный экспериментальный план с варьированием трёх факторов на трёх уровнях в форме полнофакторного экспериментального плана типа 3^3 .

Производится выбор факторов и параметра отклика. При разработке имитационной модели в качестве факторов выбраны следующие изменяемые факторы – это объём отходов на лесосеке, ёмкость кузова рубильной машины, скорость движения рубильной машины. Они включены в виде символического обозначения в соответствии с табл. 2.

Таблица 2. Символьное обозначение изменяемых факторов

Фактор	Физический показатель	Присвоенный символ
1	Скорость движения мобильной рубильной машины, км/ч	X1
2	Грузовая вместимость кузова, м ³	X2
3	Объём отходов на лесосеке, м ³	X3

В качестве параметра отклика была принята себестоимость производства щепы руб./м³ – Y1 и время освоения лесосеки, часов – Y2. Экспериментальные исследования выполнялись на базе матрицы планирования полного факторного эксперимента, составленной в программе Statistica [15, 16]. Варьирование параметров осуществлялось в диапазонах, представленных в табл. 3.

Таблица 3. Диапазон варьирования факторных признаков в ходе реализации имитационного эксперимента

Фактор	Уровни варьирования		
	X1	X2	X3
Скорость движения мобильной рубильной машины, км/ч	2	4	6
Грузовая вместимость кузова, м ³	5	10	15
Объём отходов на лесосеке, м ³	85	155	204

Прочие факторы были зафиксированы на следующих уровнях:

- объём единичной кучи отходов – 1,7 м³;
- стоимость одной смены машины – 40 000 руб.

Число наблюдений в каждой точке плана составляло 3, что обеспечило высокую устойчивость статистических показателей. Общее число запусков модели и единичных опытов, таким образом, составило 81. Данные проверялись на гипотезу о нормальности распределения в пакете программ Statistica [15, 16]. Использовались критерии Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Уилкса. В общем виде полученная регрессия имеет вид

$$Y1 = 600,68 - 32,69X1 - 23,38X2 + 0,04X3 + \varepsilon \quad (1)$$

$$R^2 = 0,81$$

В табл. 4 приведены статистические показатели коэффициентов модели.

Таблица 4. Проверка значимости коэффициентов регрессии

	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	p-level
Intercept	600,68	48,73	12,32	0,00000
X1	-32,69	6,3	-5,16	0,00003
X2	-23,38	2,53	-9,23	0,00000
X3	-0,04	0,21	-0,196	0,84

Для проверки значимости коэффициентов регрессии, т. е. значимо ли они отличаются от нуля в масштабе всей генеральной совокупности, использовались статистические методы проверки. Для начала зададимся условием о незначимом отличии от нуля параметра в генеральной совокупности. Использовалось три способа подтверждения статистической значимости коэффициентов. Согласно первому способу коэффициент регрессии значим, если его значения (по модулю) больше модуля его стандартной ошибки. Другим методом проверки значимости стало сравнение t-критерия табличным его значением (критерий распределения Стьюдента или t-критерий. Принятый уровень значимости 0,05. Если фактическое значение t-критерия больше табличного (по модулю), то основная гипотеза должна быть отвергнута и принято решение, что с вероятностью 0,95 параметр или статистическая характеристика в генеральной совокупности значимо отличается от нуля. По третьему способу проводилось сравнение показателя p-level с заданным показателем значимости в 0,05. В случае, когда расчётный p-level какого-либо из коэффициентов уравнения меньше, чем уровень значимости 0,05, то тогда нулевая гипотеза отвергается, и рассматриваемый коэффициент будет значимым. Из полученных данных видно, что для фактора X3 значение p-level превышает 0,05. Кроме того, модуль его значения меньше, чем

стандартная ошибка. Следовательно, этот фактор не значим. Откорректируем регрессию.

$$Y_1 = 594,5 - 32,69X_1 - 23,38X_2 + \varepsilon \quad (2)$$

$$R^2 = 0,87$$

В табл. 5 приведены статистические показатели коэффициентов модели.

Таблица 5. Данные по определению значимости коэффициентов полученного уравнения

	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	p-level
Intercept	594,5	36,5	16,26	0,00000
X1	-32,69	6,2	-5,26	0,000021
X2	-23,38	2,48	-9,42	0,00000

Расчётный коэффициент детерминации R^2 полученной регрессионной модели равен 0,87. Систематических отклонений результатов работы модели и вероятностного графика (рис. 3) не установлено.

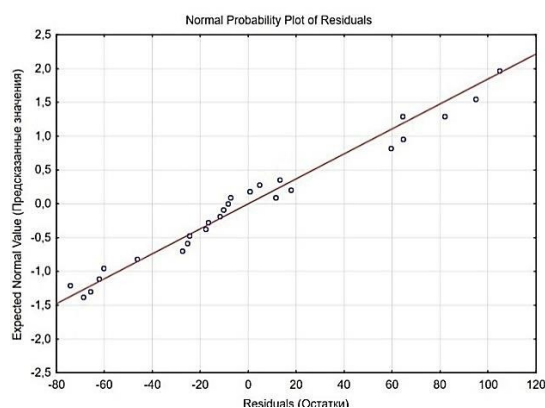


Рис. 3. Вероятностный график по результатам работы регрессионной модели

Гистограмма остатков, представленная на рис. 4, позволяет сделать вывод о характере распределения остатков по нормальному закону распределения.

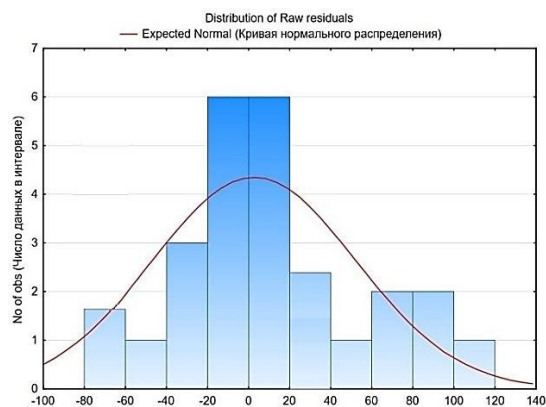


Рис. 4. Гистограмма распределения остатков

Поверхности отклика зависимости себестоимости производства щепы от изменения факторов визуально представлены на рис. 5.

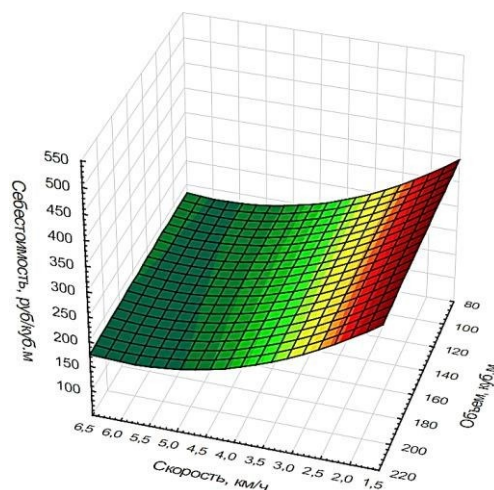
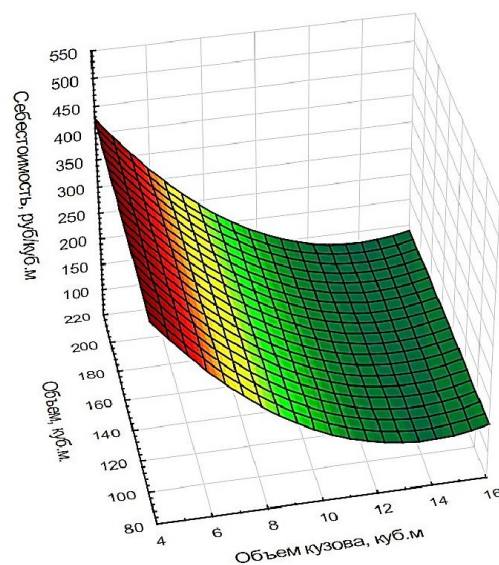
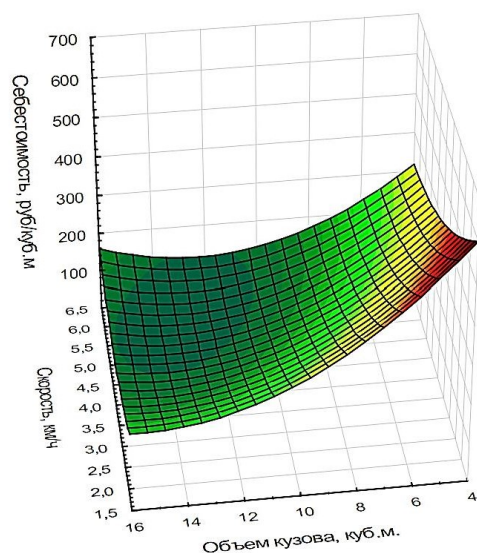


Рис. 5. Зависимость себестоимости щепы от изменения факторов

В общем виде для параметра Y_2 полученная регрессия будет иметь вид

$$Y_2 = 32,96 - 2,91X_1 - 2,08X_2 + 0,134X_3 + \varepsilon \quad (3)$$

В табл. 6 приведены статистические показатели коэффициентов модели.

Таблица 6. Данные по определению значимости коэффициентов полученного уравнения

	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	p-level
Intercept	32,96	5,57	5,91	0,000005
X1	-2,91	0,72	-4,014	0,00054
X2	-2,08	0,289	-7,17	0,00000
X3	0,134	0,0242	5,567	0,000012

Анализ показателя уровня значимости p-level говорит о том, что для всех факторов X1, X2 и X3 значение p-level не превышает 0,05. Следовательно, эти факторы значимы. Расчётный коэффициент детерминации R^2 полученной модели равен 0,88. Систематических отклонений результатов работы модели и вероятностного графика (рис. 6) не установлено.

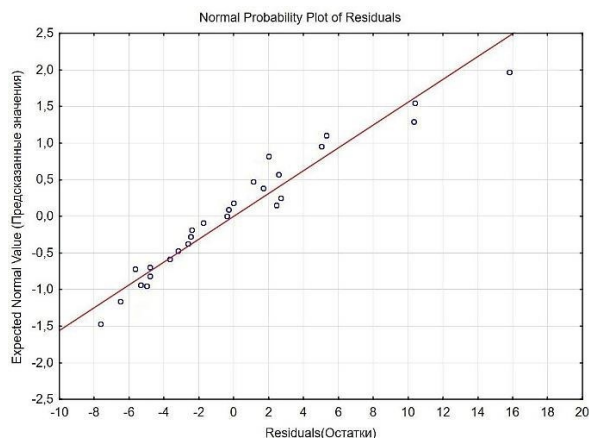


Рис. 6. Вероятностный график по результатам работы регрессионной модели

Гистограмма остатков, представленная на рис. 7 позволяет сделать вывод о характере распределения остатков близкому к нормальному закону распределения.

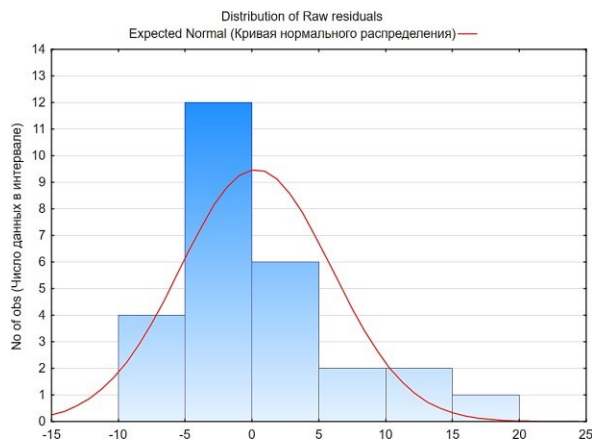


Рис. 7. Гистограмма распределения остатков

Полученные расчётные данные, характер графиков позволяют сделать вывод о слабом расхождении результатов регрессии и имитационной модели. Уравнение ре-

грессии адекватно описывает результаты имитационного моделирования. Поверхности отклика зависимости времени освоения лесосеки от изменения факторов представлены на рис. 8.

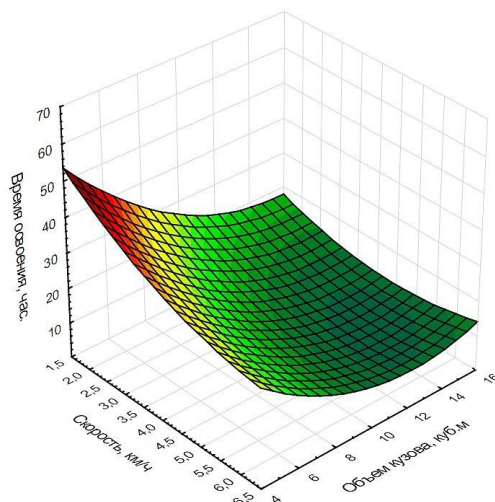
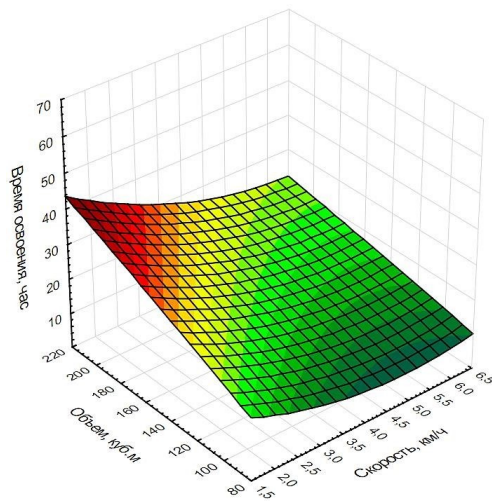
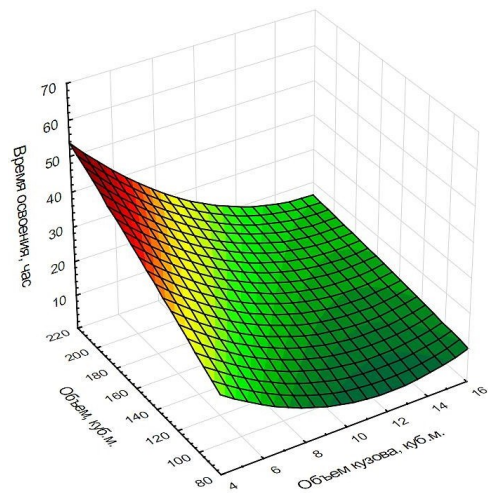


Рис. 8. Зависимость времени освоения лесосеки от изменения факторов

Анализ графиков изменения себестоимости производства щепы и времени освоения лесосеки при вари-

ровании факторов позволяет зафиксировать закономерность устойчивого влияния фактора скорости перемещения машины и ёмкости кузова, в котором транспортируется щепа. Значение фактора скорости несколько выше, чем ёмкость кузова. Очевидным является то, что для снижения себестоимости производства щепы и сокращения времени освоения лесосеки необходимы рубильные машины с максимальной скоростью движения и кузовом наибольшего объёма. Здесь возникает ограничивающий фактор состояния почвенно-грунтовых условий лесосеки, условий проходимости и манёвренности. Опираясь на технические характеристики серийной машины AXEL AX 9045, ёмкость кузова которой составляет 22 м³ щепы, можно предположить, что при условии полной загрузки кузова полезный груз составит 8–9 т, т. е. практически как загрузка стандартного форвардера. Следовательно, скорость движения машины будет также соизмерима со скоростью форвардера. По данным работы Manner J., Palmroth L [14] средняя скорость движения по лесосеке пустой машины 3,4 км/ч, гружёной на 17 % меньше. Время цикла разгрузки в среднем 23,4–23,7 секунды. То есть данные близки к параметрам, загруженным в имитационную модель.

Результаты работы и имитационные модели легли в основу «Программы моделирования работы комплекса в составе рубильной машины и транспортера щепы», на которую получено свидетельство государственной регистрации [17].

Литература

1. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2030 г. Распоряжение правительства РФ от 11 февраля 2021 года N 312-р. М., 102 с.
2. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. Утверждена Указом Президента РФ № 645 от 26 октября 2020 г. URL: <http://kremlin.ru/acts/news/64274>. (дата обращения 23.12.2025).
3. Стратегия социально-экономического развития Красноярского края до 2030 года. Электронный ресурс URL: http://www.econ.krskstate.ru/ser_kray/2030 (дата обращения 24.12.2025).
4. Долматов С.Н. Освоение низкокачественной и повреждённой древесины и древесных отходов в Красноярском крае / С.Н. Долматов, П.Г. Колесников, А.И. Пережилин // Сибирский лесной журнал. 2024. № 6. С. 88–100. DOI 10.15372/SJFS20240611. EDN GUXPIJF.
5. Долматов С.Н. Обоснование рациональной технологии производства топливной щепы в условиях реальных состояний транспортировки сырья и готовой продукции / С.Н. Долматов // Леса России и хозяйство в них. 2025. № 3(94). С. 120–135. DOI 10.51318/FRET.2025.94.3.013. EDN UVPYVL.
6. Мохирев А.П. Оптимизация маршрутов транспортировки древесины с лесосеки с учётом сезонности грузоперевозок / А.П. Мохирев, М.О. Позднякова, Т.С. Гудень // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 4(40). С. 132–140. DOI 10.18324/2077-5415-2018-4-132-140. EDN YTQRDV.
7. Соколов А.П. Имитационное моделирование процессов заготовки древесины / А.П. Соколов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. № 245. С. 244–260. DOI 10.21266/2079-4304.2023.245.244-260. EDN DZIRCP.
8. Компьютерная симуляция разработки лесосек с использованием валочно-сучкорезно-раскряжевых машин / К.П. Рукомойников, Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2(54). С. 108–113. DOI 10.18324/2077-5415-2022-2-108-113. EDN PACLCC.
9. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера / К.П. Рукомойников, Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 3. С. 69–80. DOI 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80. EDN MIBDEE.
10. Имитационное моделирование технологических процессов лесозаготовки / К.П. Рукомойников, Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2025. № 1(403). С. 145–163. DOI 10.37482/0536-1036-2025-1-145-163. EDN KHWODC.
11. Enkawa T. Gendai Operations Management – IoT Jidai no Hinshitsu, Seisansei Koujyo to Kogyaku Kachi Souzou [Modern Operations Management, Improvement of Quality and Productivity for Customers Value in the Era of IoT]. Asakura Shoten : Tokyo, Japan, 2017; ISBN 9784254275704.
12. Долматов С.Н. Компьютерная симуляция в среде AnyLogic работы мобильной рубильной машины на лесосеке / С.Н. Долматов, Т.С. Бабкина // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 2(62). С. 95–102. DOI 10.18324/2077-5415-2024-2-95-102. – EDN BAOYJQ.
13. Официальный сайт компании The AnyLogic Company производителя инструментов и бизнес-приложений имитационного моделирования [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anylogic.ru> (дата обращения: 14.12.2025).
14. Manner J. (2015). Automatic and experimental methods to studying forwarding work. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Acta Universitatis agriculturae Sueciae. ISBN 978-91-576-8454-7. 71 p.

15. Боровиков В.П. Программа Statistica для студентов и инженеров. М.: Компьютер пресс, 2000. 301 с.
16. Бородич С.А. Эконометрика : учеб. пособие / С.А. Бородич. 3 -е изд., стер. Мн.: Новое знание, 2006. 408 с.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684838 Российская Федерация. Программа моделирования работы комплекса в составе рубильной машины и транспортера щепы : заявл. 14.08.2025 : опубл. 18.09.2025 / С.Н. Долматов, С.С. Ш. Саая, Т.С. Бабкина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Туvinский государственный университет».

References

1. Strategy for the Development of the Forestry Complex of the Russian Federation through 2030. Russian Federation Government Order of February 11, 2021, No. 312-r. Moscow, 102 p.
2. Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and National Security through 2035. Approved by Presidential Decree No. 645 of October 26, 2020. URL: <http://kremlin.ru/acts/news/64274>. (Accessed December 23, 2025).
3. Strategy for the Socioeconomic Development of Krasnoyarsk Krai through 2030. Electronic resource. URL: http://www.econ.krskstate.ru/ser_kray/2030 (Accessed December 24, 2025).
4. Dolmatov S.N. Development of low-quality and damaged wood and wood waste in Krasnoyarsk Krai / S.N. Dolmatov, P.G. Kolesnikov, A.I. Perezhilin // Siberian Forestry Journal. 2024. No. 6. P. 88–100. DOI 10.15372/SJFS20240611. EDN GUXPJF.
5. Dolmatov S.N. Justification of a rational technology for the production of fuel chips under conditions of actual distances for transporting raw materials and finished products / S.N. Dolmatov // Forests of Russia and their management. – 2025. No. 3 (94). P. 120–135. DOI 10.51318/FRET.2025.94.3.013. – EDN UVPYVL.
6. Mokhirev A.P. Optimization of timber transportation routes from a logging site taking into account the seasonality of freight traffic / A.P. Mokhirev, M.O. Pozdnyakova, T.S. Guden // Systems. Methods. Technologies. 2018. No. 4(40). P. 132–140. DOI 10.18324/2077-5415-2018-4-132-140. EDN YTQRDV.
7. Sokolov A.P. Simulation modeling of timber harvesting processes / A.P. Sokolov // Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy. 2023. No. 245. P. 244–260. DOI 10.21266/2079-4304.2023.245.244-260. EDN DZIRCP.
8. Computer simulation of logging development using felling-de-limbing-bucking machines / K.P. Rukomoynikov, T.V. Sergeeva, T.A. Gilyazova [et al.] // Systems. Methods. Technologies. 2022. No. 2(54). P. 108–113. DOI 10.18324/2077-5415-2022-2-108-113. EDN PACLCC.
9. Simulation modeling of the technological process of timber harvesting using a forest harvester as an example / K.P. Rukomoynikov, T.V. Sergeeva, T.A. Gilyazova [et al.] // Forestry Bulletin. 2023. Vol. 27, No. 3. Pp. 69–80. DOI 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80. EDN MIBDEE.
10. Simulation modeling of technological processes of logging / K.P. Rukomoynikov, T.V. Sergeeva, T.A. Gilyazova [et al.] // News of higher educational institutions. Forestry Journal. 2025. No. 1(403). Pp. 145–163. DOI 10.37482/0536-1036-2025-1-145-163. EDN KHWODC.
11. 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; ISBN 9784254275704.
12. Dolmatov S.N. Computer simulation in the AnyLogic environment of the operation of a mobile chipper in a logging site / S.N. Dolmatov, T.S. Babkina // Systems. Methods. Technologies. 2024. No. 2(62). P. 95–102. DOI 10.18324/2077-5415-2024-2-95-102. EDN BAOYJQ.
13. Official website of The AnyLogic Company, a manufacturer of simulation modeling tools and business applications [Electronic resource] URL : <https://www.anylogic.ru> (accessed: 12/14/2025).
14. Manner J. (2015). Automatic and experimental methods to studying forwarding work. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Acta Universitatis agriculturae Sueciae. ISBN 978-91-576-8454-7. 71 p.
15. Borovikov V.P. Statistica program for students and engineers. Moscow : Computer Press, 2000. 301 p.
16. Borodich S.A. Econometrics: textbook / S.A. Borodich. 3rd ed., reprinted. Minsk: New knowledge, 2006. 408 p.
17. Certificate of state registration of the computer program No. 2025684838 Russian Federation. Program for modeling the operation of a complex consisting of a chipping machine and a wood chip conveyor: declared 14.08.2025 : published 18.09.2025 / S.N. Dolmatov, S.S.Sh. Saaya, T.S. Babkina ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tuva State University".