

УДК 630

UDC 630

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ВЫРАЩИВАНИЯ И ЗАГОТОВКИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БИОМАССЫ В  
ЛЕСНОМ КОМПЛЕКСЕ**

**SIMULATION OF ENERGY BIOMASS  
GROWTH AND HARVESTING IN A FOREST  
SECTOR**

Онучин Евгений Михайлович  
к.т.н., доцент

Onychin Evgeny Mihailovich  
Cand.Tech.Sci., assistant professor

Семенов Александр Анатольевич  
аспирант

Semenov Alexander Anatolyevich  
postgraduate student

Алексеев Александр Эрикович  
аспирант  
*Поволжский государственный технологический  
университет, Йошкар-Ола, Россия*

Alekseev Alexander Erikovich  
postgraduate student  
*Volga State University of Technology, Ioshkar-Ola,  
Russia*

В статье приведено описание имитационной модели процессов выращивания и заготовки биомассы в энергетических лесах. Рассмотрены подходы и особенности моделирования процессов выращивания и заготовки

The article describes the simulation model of the processes of growing and harvesting of forest biomass for energy. It presents the approaches and features of the grows modeling and harvesting processes

Ключевые слова: ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, ПОСАДКА САЖЕНЦЕВ, ОБРАБОТКА ПОЧВЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЛЕСА

Keywords: SIMULATION MODELS, PLANTING, CULTIVATION, ENERGY FORESTS

***Введение***

Энергетические леса – одно из наиболее перспективных направление использования заброшенных земель в зоне хвойно-широколиственных лесов, позволяющее решить широкий комплекс задач как социально-экономического развития данных территорий, так и повышения экологичности экономики страны, в частности её топливно-энергетического комплекса.

Комплекс работ, связанных с выращиванием и заготовкой биомассы в энергетических лесах, является достаточно обширным и включает в себя операции, связанные с обработкой почвы и посадкой семян при формировании насаждений, а также операции, связанные с заготовкой накопленной биомассы. При этом данные технологические процессы имеют ряд достаточно существенных особенностей в сравнении с традиционными технологиями лесосечно-лесовосстановительных работ. Главной особенностью при создании энергетических лесов, отличающей

данный процесс от привычного искусственного лесовосстановления или лесоразведения, является использование площадей, вышедших из-под сельскохозяйственного пользования, а также при формировании энергетических лесных плантаций более низкие требования к биоразнообразию и устойчивости формируемой лесной экосистемы. Особенности заготовительного процесса применительно к работе в энергетических плантациях является практически полное отсутствие требований по сохранению лесной среды и качества заготавливаемой древесины, но повышенные требования к обеспечению минимальной энергоёмкости выполнения данных работ в силу того, что энергия, затраченная при выращивании и заготовке просто «вычитается» из собираемого «урожая» биомассы.

В соответствии с обозначенными особенностями для эффективного выращивания и заготовки биомассы в энергетических лесах необходим специфический комплекс машин, при этом технологические процессы должны быть ориентированы на выполнение минимального количества операций для обеспечения наименьших энергозатрат. Минимально необходимым комплексом работ в условиях хвойно-широколиственных лесов является посадка сеянцев и заготовка биомассы, однако применительно к землям, вышедшим из сельскохозяйственного пользования, богатых в сравнении с лесными почвами, посадка сеянцев деревьев без предварительной обработки почвы приведёт к их угнетению травянистой растительностью, что в подавляющем большинстве случаев требует использования предварительной обработки почвы перед посадкой. Таким образом, очерчивается круг работ по выращиванию и заготовке биомассы энергетических лесов. Очевидно, что комплекс машин для механизации должен быть сформирован на единой базе и в силу сезонности работ по выращиванию биомассы должен обладать модульными свойствами, обеспечивающими более равномерную и, как

следствие, эффективную загрузку базовых универсальных модулей (как правило – тягово-энергетических). Разнообразие природных ландшафтов, на которых могут быть сформированы энергетические леса, выдвигает дополнительные требования к машинам, в частности появляется требование адаптивности к различным природно-производственным условиям.

Для эффективного решения задач инженерного синтеза и проектирования как технологических процессов выращивания и заготовки биомассы в энергетических лесах, так и машин и других технических средств для их выполнения необходимы научные исследования, направленные на установление качественных и количественных зависимостей между показателями эффективности данных процессов, характеристиками способов выполнения операций и конструктивно-технологическими параметрами, применяемых при этом машин в различных природно-производственных условиях. Выявление данных зависимостей позволит с достаточной для решения практических задач на теоретическом уровне раскрыть вопросы взаимодействия и взаимовлияния всех компонентов, составляющих комплекс работ по выращиванию и заготовке биомассы в энергетических лесных плантациях и культурах. Практическая значимость данного исследования выражается в расширении научно-методического и информационного обеспечения прикладных НИР и ОКР, направленных на разработку новых и модернизацию существующих технологических процессов и машин для выращивания и заготовки биомассы, что позволит повысить их качество и, как следствие, конкурентоспособность разрабатываемой продукции.

### ***Объект и предмет исследования***

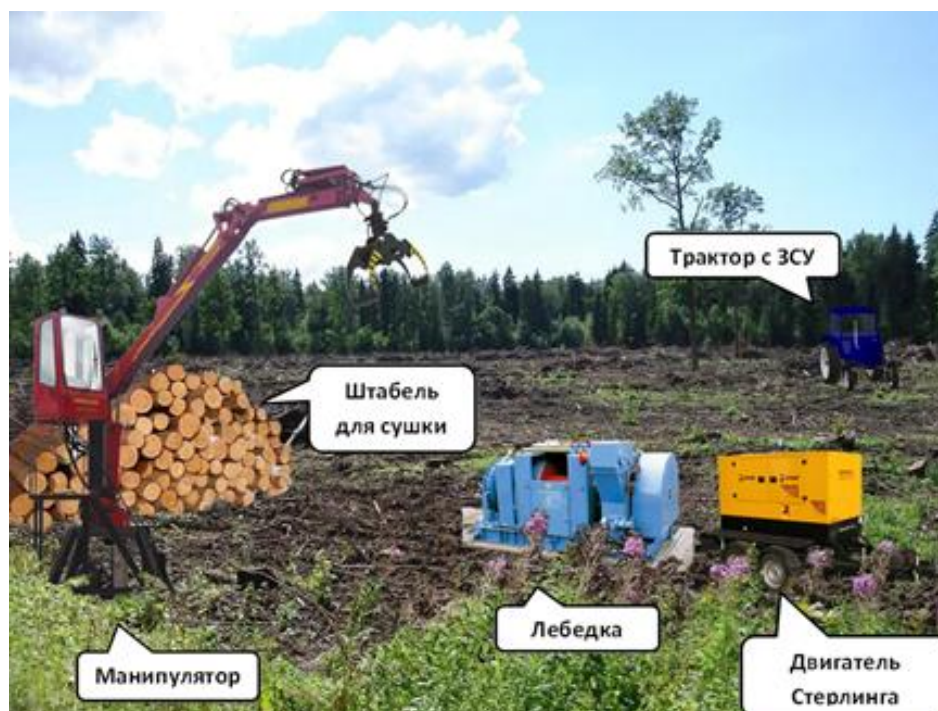
Минимальный комплекс агротехнических приёмов выращивания энергетической биомассы включает в себя работы по обработке почвы и <http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/16.pdf>

посадке сеянцев растений. Эти операции могут проводиться как отдельно с применением различных машин, так и совмещённо, при этом большинство перспективных разработок в этой области ориентировано именно на совмещённое выполнение этих работ. Способы заготовки энергетической биомассы наиболее распространённые в настоящее время, как правило, предполагают её измельчение в щепу непосредственно у пня, однако, такое выполнение данной операции имеет ряд недостатков, в частности, измельчается влажная древесина, что требует больших затрат энергии, а также затраты энергии покрываются за счёт «дорого» в рассматриваемом контексте ископаемого топлива для машин. Исходя из указанных соображений, более перспективной является технология заготовки биомассы, предполагающая срезание деревьев, их пакетирование, трелёвку и укладку в штабель для естественной сушки на верхнем складе, с последующей погрузкой и вывозкой уже сухой биомассы (рисунок 1).

#### *Машина для обработки почвы*

Машина состоит из рамы, на которой установлена балка имеющая возможность неограниченного вращения вокруг оси. Параллельно балке установлена зубчатая рейка. На балке установлены рабочие органы, состоящие из дискового ножа, стойки и узла поворота дискового ножа. Рабочие органы перемещаются вдоль балки посредством гидроцилиндров. Вращение балки осуществляется посредством цепной передачи от редуктора с приводом от вала отбора мощности.

Работа агрегата осуществляется следующим образом. Трактор подъезжает на место вспашки. Рабочие органы сдвигаются к середине балки. Включается приводной механизм, разгоняющий подвижную балку, с установленными на ней рабочими органами, до необходимой скорости, после чего гидрофицированной навеской трактора агрегат опускается до заглубления рабочих органов на требуемую глубину.



**Рисунок 1 - Перспективная технология заготовки биомассы**

После одного оборота балки включаются гидроцилиндры, перемещающие рабочие органы к концам балки, при этом рабочие органы движутся по спирали. Когда рабочие органы достигнут конца балки, приводной механизм и гидроцилиндры останавливаются, и вращение прекращается за счет сил трения. Таким образом, происходит вспашка небольшого участка. После этого агрегат поднимается гидрофицированной навеской трактора, и трактор переезжает на следующий участок.

#### *Машина для посадки саженцев*

Лесопосадочная машина включает основание, на котором смонтированы подающие сеянцы устройства и раму с высаживающими устройствами; основание и рама соединены при помощи гибкого манипулятора.

На основании смонтированы ресивер со сжатым воздухом, подпитывающийся, от пневмосистемы агрегируемого трактора, транспортёр, с одной из сторон которого установлен качающийся жёлоб, под которым размещён затвор, соединенный с сеянцепроводом, расположенным внутри гибкого манипулятора.

На раме смонтированы сошник, шарнирно закрепленный при помощи горизонтальной оси, приемник для семян и заделывающее устройство в виде конических катков.

Лесопосадочная машина работает следующим образом.

Перед началом посадки семян оператор загружает на транспортёр контейнеры с сеянцами, гибкий манипулятор подтягивается к агрегируемому трактору, приводится в действие транспортёр, который захватывает контейнеры с сеянцами и подаёт поштучно в качающийся жёлоб, качающийся жёлоб отклоняется и сеянец опускается в полость затвора. Затем приводится в действие сошник. После того как сошник займёт крайнее нижнее положение, создаётся избыточное давление в полости затвора путём подвода сжатого, под действием которого сеянец движется по каналу сеянопровода гибкого манипулятора в приёмник для семян и оказывается в лунке, образованной сошником. При подтягивании манипулятора корневая система сеянца закрывается почвой заделывающим устройством. При выполнении данных операций агрегируемый трактор находится в движении, после окончания посадки гибкий манипулятор подтягивается к машине и цикл продолжается.

#### *Машина для валки и пакетирования*

Конструкция автоматизированного ЗСУ, включает стойку с механизмами срезания, зажима дерева, и накопителя на которой установлены датчики отклонения, стойка соединена с подрамником при помощи карданного шарнира, при помощи шаровых шарниров на стойке закреплены гидроцилиндры наклона стойки в продольной и поперечной плоскостях, другие концы которых закреплены при помощи шаровых шарниров на подрамнике, также на подрамнике установлен электронный блок управления, воспринимающий сигналы датчиков отклонения ЗСУ от равновесного состояния и подающий командные сигналы на

двухсекционный электроуправляемый гидрораспределитель, связанный с гидроцилиндрами привода наклона стойки.

Устройство работает следующим образом. Базовая машина своим ходом подводит установленное на ней при помощи подрамника захватно-срезающее устройство к нужному дереву, устройством зажима фиксирует дерево у стойки и одновременно срезает его механизмом срезания; далее дерево перемещается в накопитель, вмещающий 5-10 деревьев, в зависимости от их размеров. После заполнения накопителя, пачка обвязывается чокерами, связанными с канатной установкой, и выгружаются на землю. При отклонении захватно-срезающего устройства с накопителем вследствие действия возмущающих воздействий, как порыв ветра или неровность грунта, датчики, отклонения на стойке измеряют крен в продольной и поперечной плоскостях, после чего связанный с ними электронный блок управления высчитывает по запрограммированной в нем модели равновесия системы необходимые коррективы и воздействует на гидрораспределители, задающие степень хода поршня приводных гидроцилиндров, отклоняющих стойку в нужном положении для сохранения устойчивости. Такая конструкция унифицирована с базовыми малогабаритными тракторами (например, с Т-25, МТ-10, МТ-3, Л-82, и др.) за счет использования трехточечного навесного устройства и добавления гидрораспределителя с электронным управлением.

Таким образом, объектом исследования является адаптивно-модульный машинно-технологический комплекс для выращивания и заготовки энергетической биомассы в лесных культурах и лесных плантациях, включающий машины для обработки почвы, посадки семян, срезания и пакетирования деревьев, трелёвки и укладки в штабель.

Предметом исследования является выявление качественных и количественных зависимостей между конструктивно-технологическими параметрами адаптивно-модульного машинно-технологического

комплекса и показателями эффективности его функционирования в различных природно-производственных условиях.

### *Методология моделирования*

Разработка математических моделей устанавливающих количественные связи между конструктивными и/или технологическими параметрами машин и процессов представляет собой классическую задачу инженерных наук, связанных с лесозаготовками и лесовосстановлением. Ретроспективный анализ показывает, что методология математического моделирования процессов и машин в лесном комплексе прошла достаточно длинный путь развития от аналитических детерминированных линейных (как статических, так и динамических) моделей до вероятностных и имитационных [1-6]. Бурное развитие имитационного моделирования в науке в целом, и применительно к лесоинженерным наукам в частности, имеет естественный базис в виде объективного роста вычислительной мощности современных компьютеров и их доступности для широкого круга исследователей. Имитационные модели позволяют получить как качественную, так и количественную оценку влияния на моделируемые процессы различных параметров, при этом сами процессы могут носить выраженный характер нелинейных и стохастических, что делает предпочтительным для моделирования лесосечных и лесовосстановительных работ именно этот метод. При этом не смотря на достаточно большое количество предложенных имитационных моделей, касающихся как лесосечных, так и лесовосстановительных работ в них не нашло отражение основополагающих особенностей процессов по выращиванию и заготовке энергетической биомассы в лесных культурах и плантациях, но они представляют собой хорошую базу для разработки имитационной модели, учитывающей данные особенности.



### *Обоснование подхода к моделированию*

Предмет исследований определяет перечень моделируемых составляющих работ по выращиванию и заготовке энергетической биомассы в лесных культурах и лесных плантациях. Данными составляющими на этапе выращивания являются лесокультурная площадь, характеризующая рельефом, параметрами почвенного покрова, наличием непреодолимых препятствий для рабочих органов лесохозяйственных машин (пни, валуны и т. д.), технологический процесс создания энергетических культур, характеризуемый способом обработки почвы и рядом технологических параметров (густота и схема размещения сеянцев, способы движения машин и т. д.), технологические машины, характеризующиеся своими конструктивно-технологическими параметрами (масса, мощность, скорости выполнения операций, выдерживаемые нагрузки и т. д.). На этапе заготовки биомассы составляющей моделируемых работ кроме вышперечисленных является древостой, характеризующийся как параметрами отдельного дерева, так и параметрами их размещения на площади.

Моделируемыми процессами данного исследования являются в первую очередь процессы взаимодействия машин с предметом труда. На стадии формирования энергетических плантаций и культур это процессы движения машины по лесокультурной площади с учётом имеющихся непреодолимых препятствий, непосредственно процесс обработки почвы, процессы высадки сеянцев. На стадии заготовки добавляются процессы взаимодействия машин с биомассой, такие как срезание деревьев, их пакетирование, трелёвка, штабелёвка.

Анализ данного перечня составляющих работ и моделируемых процессов показывает, что они носят выраженный нелинейный и стохастический характер. При этом нелинейность вызвана главным образом дискретностью моделируемых процессов, а стохастичность тем,

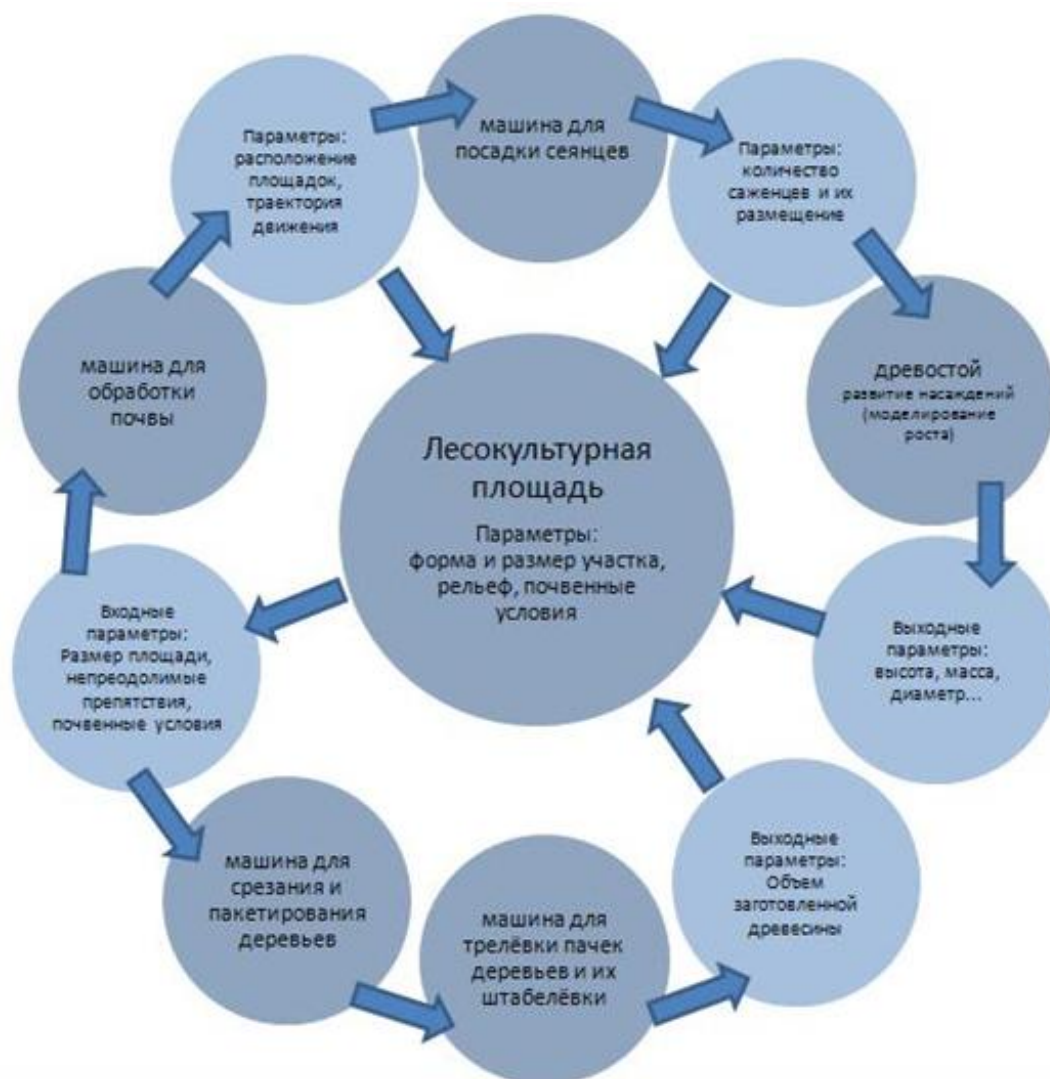
что большинство параметров составляющих работ представляют собой либо случайные величины, либо случайные процессы. В этой связи наиболее целесообразным является использование метода дискретно-событийного имитационного моделирования, при котором исследуемый процесс разбивается на ряд отдельных, но взаимосвязанных и взаимодействующих «элементарных» событий, параметры которых в каждом опыте представляют собой реализации некоторого перечня случайных величин и процессов.

### *Схема моделирования*

Согласно вышеизложенным положениям была разработана имитационная модель процессов выращивания и заготовки биомассы в энергетических лесах, общая схема которой представлена на рисунке 2.

Модель состоит из шести блоков: блока лесокультурной площади, блока древостоя, блока машины для обработки почвы, блока машины для посадки сеянцев, блока машины для срезания и пакетирования деревьев и блока машины для трелёвки пачек деревьев и их штабелёвки для естественной сушки.

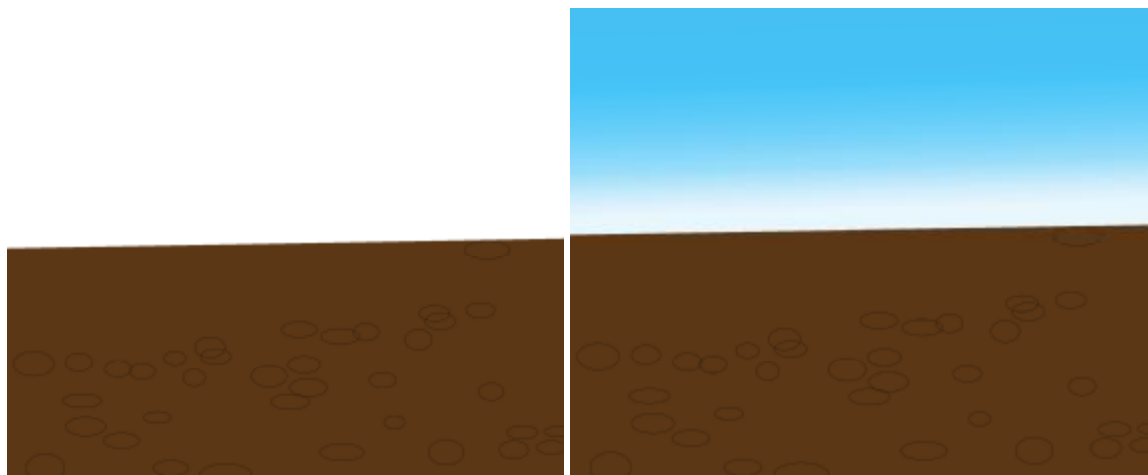
В блоке лесокультурной площади генерируется по исходным данным цифровая модель территории, на которой выполняются работы по созданию энергетических лесных культур или плантаций. Исходными данными для цифровой модели являются форма и размеры участка, его рельеф, характеристика почвенно-грунтовых условий (мощность почвенного покрова, удельное сопротивление резанию почвы, её влажность, коэффициент сопротивления движению), а также количество и размеры непреодолимых препятствий для рабочих органов почвообрабатывающей машины и закон их распределения по площади (пуассоновское, равномерное или контагиозное).



**Рисунок 2 - Общая схема имитационной модели процессов выращивания и заготовки биомассы в энергетических лесах**

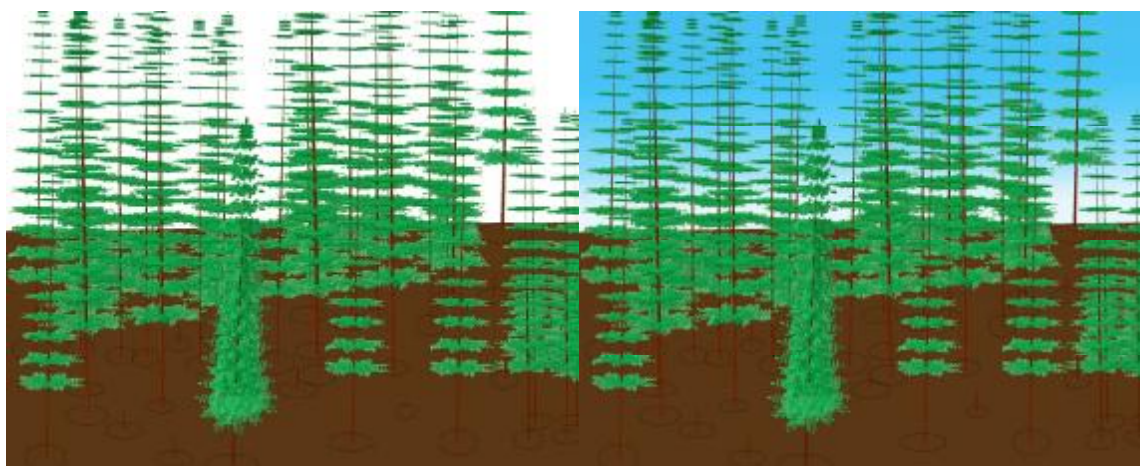
Непреодолимые препятствия моделируются в виде кругов, диаметр которых представляет случайную величину с заданным законом распределения. Пример цифровой модели лесокультурной площади сгенерированной по заданным параметрам приведён на рисунке 3.

В блоке древостоя по исходным данным аналогичным образом формируется цифровая модель деревьев, отражающая координаты каждого дерева на участке и ряд его параметров (диаметр в месте срезания, высота, масса, высота центра тяжести относительно плоскости срезания, момент инерции относительно поперечной оси, проходящей через центр тяжести дерева).



**Рисунок 3 - Пример цифровой модели лесокультурной площади сгенерированной по заданным параметрам**

Координаты деревьев и их масса наследуются из блока машины для посадки семян с учётом моделирования роста насаждения. Остальные параметры генерируются как случайные величины коррелированные с величиной массы дерева. Пример цифровой модели древостоя также приведён на рисунке 4.



**Рисунок 4 - Пример цифровой модели древостоя**

Блок машины для обработки почвы на вход получает цифровую модель лесокультурной площади и конструктивно-технологические параметры самой машины (минимальный и максимальный диаметр обрабатываемых участков, параметры рабочих органов, скорости обработки почвы и перемещения, номинальная мощность двигателя,

ёмкость и алгоритм работы энергоаккумулятора, масса машины). По этим исходным данным в блоке имитируется работа машины по следующему алгоритму. На первом этапе определяется положение на лесокультурной площади обрабатываемых участков. Для этого программа размещает круг обрабатываемого участка на лесокультурной площади и проверяет, пересекает ли он непреодолимые для рабочих органов машины препятствия, имеющиеся в цифровой модели лесокультурной площади. Если таких пересечений нет, то на этом этапе данное размещение обрабатываемого участка считается принятым и выполняется попытка размещения следующего обрабатываемого участка. При наличии пересечений происходит либо сдвиг обрабатываемого участка по одному из четырёх направлений, либо уменьшение его размеров на некоторую достаточно малую величину единичного шага, при этом приоритет отдаётся тем действиям, которые обеспечивают минимум эвристической функции, представляющей собой площадь взаимного пересечения, что позволяет найти наилучшее расположение кругов обрабатываемых участков на лесокультурной площади. На следующем этапе при наличии на лесокультурной площади препятствий непреодолимых для движения машины (деревьев, крупных валунов и т. д.) каждый круг обрабатываемого участка проверяется на доступность для машины, при этом используется разработанный ранее алгоритм моделирования движения машины по ленте леса [2,3]. Положение доступных кругов считается окончательным, недоступные круги либо просто удаляются из обрабатываемых участков, либо запускается аналогичный алгоритм их смещения в зону машинной доступности.

После определения положения кругов обрабатываемых участков на лесокультурной площади прокладывается траектория движения машины для обработки почвы по лесокультурной площади, которая разбивается на ряд участков, для каждого из которых определяется коэффициент

сопротивления движению машины и продольный уклон. Для каждого из кругов обрабатываемых участков также определяется средневзвешенное удельное сопротивление резанию почвы. Указанные данные позволяют определить затраты времени, энергии и действующие усилия в процессе выполнения операции по обработке почвы.

Блок машины для посадки семян функционирует аналогично блоку машины для обработки почвы и позволяет моделировать как совмещённое, так и раздельное выполнение операций по обработке почвы. Также в результате работы блока рассчитываются затраты времени и энергии на выполнение операции посадки семян.

Блок машины для срезания и пакетирования деревьев в качестве входных параметров имеет цифровые модели лесокультурной площади и древостоя, а так же конструктивно-технологические параметры самой машины (масса, номинальная мощность, ёмкость и алгоритм работы энергоаккумулятора, скорости рабочих движений, грузоподъёмность). Траектория движения машины может как задаваться (например, при работе в густых насаждениях плантаций фронтальным способом), так и находиться с использованием алгоритма моделирования движения лесной машины по ленте леса (при уходах за культурами и заготовке в них биомассы). Далее последовательно определяются затраты времени, энергии и действующие усилия в процессах перемещения от дерева к дереву, срезания и пакетирования. Таким образом, кроме циклограмм затрат времени и энергии, а также действующих усилий, определяемых аналогично другим машинам, в результате работы блока на лесосеке формируются пачки деревьев, для каждой из которых определено её положение (координаты и ориентация), а так масса.

Блок машины для трелёвки и штабелёвки пачек деревьев по входным данным (цифровая модель лесокультурной площади, описанию пачек деревьев, сформированных машиной для срезания и пакетирования,

конструктивно-технологическим параметрам самой машины – номинальная мощность, ёмкость и алгоритм работы энергоаккумулятора, максимальная длина тягового каната) определяет траектории по которым осуществляется трелёвка каждой пачки и с учётом коэффициентов сопротивления и уклонов аналогично другим блокам модели, в которых имитируется работа технологических машин при выращивании и заготовке биомассы в энергетических лесных культурах и плантациях.

### ***Вывод***

Реализованный в разработанной модели подход к машинно-технологическому обеспечению работ по выращиванию и заготовке биомассы в энергетических лесных культурах и плантациях как к единому адаптивно-модульному комплексу, сформированному на единой базе, позволяет определить наиболее целесообразные конструктивно-технологические параметры как универсальных, так и специализированных модулей и таким образом выполнить параметрическую оптимизацию комплекса заданной структуры. При этом дальнейшее развития данного подхода делает возможным и постановку задач структурной оптимизации (синтеза оптимальной структуры модульного машинно-технологического комплекса).

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (Соглашение № 14.В37.21.0301).

### **Библиографический список**

1. Жуков, А.В. Теория лесных машин / А.В.Жуков. – Минск: БГТУ, 2001. – 640 с.
2. Ширнин, Ю.А. Процессы комплексного освоения участков лесного фонда при малообъемных лесозаготовках: Научное издание / Ю.А.Ширнин, К.П.Рукомойников, Е.М.Онучин; Под ред. Ю.А.Ширнина. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – 196 с.
3. Сидыганов, Ю.Н. Модульные машины для рубок ухода и лесовосстановления: монография / Ю.Н.Сидыганов, Е.М.Онучин, Д.М.Ласточкин. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2008. – 336 с.
4. Александров, В.А. Механизация лесосечных работ в России / В.А.Александров. – СПб.: СПбЛТА, 2000. – 208 с.
5. Александров, В.А. Модифицированные сельскохозяйственные тракторы для лесозаготовок / В.А.Александров, Н.А.Гуцелюк, С.Ф.Козьмин. – М.: ВНИПИЭИлеспром, 1986. – 24 с.
6. Заикин, А. Н. Теория, методы и модели интенсификации лесосечных работ, монография [Текст] / А.Н. Заикин. – Брянск: БГИТА, 2009. – 212 с.