Resources and Technology 23 (4): 21-46, 2026
ISSN 2307-0048
http://rt.petrsu.ru

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9604
УДК 630*378.33
Статья

Математическое моделирование движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру в однородной среде

Васильев Владимир Викторович
кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Воронеж, Российская Федерация), vasiliev.vladimir87@mail.ru

Получена: 18 апреля 2026 / Принята: 6 октября 2026 / Опубликована 13 ноября 2026

Аннотация: Представлена математическая модель движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру в однородной среде, которая учитывает все основные сопротивления, оказывающие непосредственное влияние на движение плоской сплоточной единицы по транспортёру. В частности, получены формулы для расчёта конечной скорости движения плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру, пройденного пути плоской сплоточной единицей, а также установлена связь мгновенной скорости движения плоской сплоточной единицы по роликовому транспортёру с её координатой. Для реализации указанной математической модели разработана компьютерная программа, позволяющая представлять результаты моделирования в виде графических зависимостей. Полученные в процессе моделирования графические зависимости дают возможность изучить влияния параметров наклонного роликового транспортёра, его угла наклона относительно горизонта, а также параметров плоских сплоточных единиц и физических свойств древесины на скорость и продолжительность движения сплоточных единиц по роликовому транспортёру. Программа также обеспечивает расчёт пройденного пути, на котором плоские сплоточные единицы достигнут заданной скорости, и определение пройденного пути от продолжительности спуска. Выполненное посредством реализации математической модели исследование влияния длины наклонного роликового транспортёра и угла его наклона относительно горизонта на конечную скорость движения плоских сплоточных единиц и на продолжительность их спуска позволило получить графические зависимости

© Васильев В. В., 2026

конечной скорости движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру и продолжительности их спуска от длины роликового транспортёра и его угла наклона. Указанные зависимости показывают, что при увеличении длины роликового транспортёра конечная скорость движения плоских сплоточных единиц и продолжительность их спуска возрастают по закону квадратичной функции. При увеличении угла наклона роликового транспортёра относительно горизонта конечная скорость движения плоских сплоточных единиц увеличивается, а продолжительность их спуска сокращается. Анализ полученных графических зависимостей конечной скорости движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру и продолжительности их спуска от длины транспорта и угла его наклона относительно горизонта показал, что наибольшей конечной скоростью движения обладает плоская сплоточная единица, выполненная по патенту № 2777676 РФ, а продолжительность её спуска по наклонному роликовому транспортёру меньше, чем продолжительность спуска плоских сплоточных единиц, выполненных по патентам № 210485 РФ и № 2777676 РФ, из-за более высокой силы скатывания, обусловленной конструктивными особенностями плоской сплоточной единицы (патент № 2777676 РФ).

Ключевые слова: плоская сплоточная единица; наклонный роликовый транспортёр; математическая модель

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9604
Article

Mathematical modeling of flat solid units movement along an inclined roller conveyor in a homogeneous medium

Vladimir Vasiliev
D. Sc. in engineering, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great (Voronezh, Russian Federation), vasiliev.vladimir87@mail.ru

Received: 18 April 2026 / Accepted: 6 October 2026 / Published: 13 November 2026

Abstract: A mathematical model of flat solid units movement along an inclined roller conveyor in a homogeneous medium is presented, which takes into account all the main resistances that have a direct impact on the movement of a flat solid unit along the conveyor. In particular, formulas are obtained for calculating the final speed of a flat solid unit movement along an inclined roller conveyor, the distance traveled by a flat solid unit, and the relationship between the instantaneous speed of a flat solid unit movement along a roller conveyor and its coordinate is established. To implement this mathematical model, a computer program has been developed that allows the results of the simulation to be presented in the form of graphical dependencies. The graphical dependencies obtained during the simulation process provide an opportunity to study the influence of the parameters of the inclined roller conveyor, its canting angle, as well as the parameters of the flat solid units and the physical properties of the wood, on the speed and duration of the solid units movement along the roller conveyor. The program also provides calculation of the traveled distance at which flat solid units will reach the specified speed, and determination of the traveled distance from the duration of the descent. The study of the effect of the inclined roller conveyor length and its canting angle on the final speed of movement of flat solid units and the total duration of their descent, calculated with the mathematical model, allowed us to obtain graphical dependencies of the final speed of flat solid units movement on the inclined roller conveyor and the total duration of their descent on the length of the roller conveyor and its angle of inclination. The above dependencies show that as the length of the roller conveyor increases, the final speed of the flat units and the duration of their descent increase according to a quadratic function. As the canting angle of the roller conveyor increases, the final speed of the flat units increases, and the duration of their descent decreases. An analysis of the obtained graphical dependencies of the final speed of flat solid units movement along an inclined roller conveyor and the total duration of their descent on the length of the conveyor and its canting angle showed that the flat solid

unit made according to patent No. 2777676 of the Russian Federation has the highest final speed of movement, and the duration of its descent along the inclined roller conveyor is shorter than the duration of descent of flat solid units made according to patents No. 210485 of the Russian Federation and No. 2777676 of the Russian Federation, due to the higher rolling force caused by the design features of the flat solid unit (RF Patent No. 2777676).

Keywords: flat solid unit; inclined roller conveyor; mathematical simulation

1. Введение

Международная практика организации первоначального сплава круглых лесоматериалов требует выполнения определённого комплекса работ [1—5], связанных не только с подготовкой заготовленных лесоматериалов к сплаву, но и с изготовлением из них однорейсовых транспортных единиц в виде сплоточных единиц и плотов на их основе. Для первоначального сплава круглых лесоматериалов в сплоточных единицах разработаны плоские сплоточные единицы [6—11], обладающие малой осадкой и высоким коэффициентом полнодревесности. При этом особенности конструкций усовершенствованных плоских сплоточных единиц позволяют выполнять их изготовление машинным способом в специальных сплоточных машинах [12] или в специализированных грузовых платформах [13], [14], что снижает трудозатраты и обеспечивает высокую производительность сборки данных сплоточных единиц.

Машинное изготовление усовершенствованных плоских сплоточных единиц на береговых складах предусматривает перемещение сплоточных единиц по территории склада после их изготовления [15], [16]. Перемещение изготовленных плоских сплоточных единиц осуществляется от места изготовления к местам хранения или формирования малогабаритных плотов, спуска в водоём. Для перемещения плоских сплоточных единиц по территории берегового склада усовершенствованы специальные технические средства [17—19], а именно: подъёмно-транспортный агрегат, грузовая платформа и роликовый транспортёр. Особый интерес представляет способ транспортировки плоских сплоточных единиц по роликовому транспортёру, который может быть использован при спуске сплоточных единиц в водоём [18—21], а также при спуске сплоточных единиц к месту хранения или на затопляемое плотбище для формирования из них малогабаритных плотов. Причём спуск плоских сплоточных единиц по роликовому транспортёру должен осуществляться на опыте [22—27] выполнения спуска абсолютно твёрдых тел по данному транспортёру в производственных условиях.

При использовании роликового транспортёра [19] для спуска усовершенствованных плоских сплоточных единиц [6—8] к месту их хранения или на затопляемое плотбище для формирования из них малогабаритных плотов необходимо обоснование угла наклона транспортёра относительно горизонта. Угол наклона роликового транспортёра относительно горизонта определяет скорость движения плоских сплоточных единиц в конце спуска и время, затрачиваемое непосредственно на спуск. В совокупности данные показатели необходимы для обеспечения безопасного спуска плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру в пункт назначения, а характер изменения этих показателей должен изучаться на математической модели движения плоских сплоточных единиц по роликовому транспортёру. Исходя из вышесказанного, возникает необходимость построения математической модели движения плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру в однородной среде, с последующим исследованием влияния основных факторов на скорость движения усовершенствованных плоских сплоточных единиц по транспортёру и продолжительность их спуска, что является целью настоящей работы.

2. Материалы и методы

Представим, что плоская сплоточная единица является абсолютно твёрдым телом, тогда, согласно источнику [21], при спуске плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру их движение будет характеризоваться прямолинейным равноускоренным, т. е. имеет место разгон плоских сплоточных единиц. Происходит совместное движение роликов и плоской сплоточной единицы. При данных условиях сумма сил сопротивления движению каждой плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру равна:

$$\sum F_{СПСЕ} = F_{1ПСЕ} + F_{2ПСЕ} + F_{3ПСЕ} + F_{4ПСЕ} + F_{5ПСЕ} + F_{6ПСЕ} + F_{7ПСЕ} + F_{8ПСЕ}, \quad (1)$$

где $F_{1ПСЕ}$ — сопротивление движению плоской сплоточной единицы от трения в опорах вращающихся единиц, кН; $F_{2ПСЕ}$ — сопротивление движению плоской сплоточной единицы от её качения по цилиндрическим рифлёным роликам вращающихся единиц, кН; $F_{3ПСЕ}$ — сопротивление движению плоской сплоточной единицы от её трения скольжения по цилиндрическим рифлёным роликам вращающихся единиц, кН; $F_{4ПСЕ}$ — сопротивление движению плоской сплоточной единицы от силы инерции вращающихся единиц, кН; $F_{5ПСЕ}$ — сила инерции сплоточной единицы, кН; $F_{6ПСЕ}$ — сопротивление движению плоской сплоточной единицы по коническим гладким роликам вращающихся единиц, кН; $F_{7ПСЕ}$ — сопротивление движению плоской сплоточной единицы от воздушной среды, кН; $F_{8ПСЕ}$ — местное сопротивление движению плоской сплоточной единицы, кН.

Представленные силы сопротивления движению плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру оказывают влияние на характер движения данной сплоточной единицы по транспортёру. Каждая из представленных сил сопротивления имеет постоянное или кратковременное влияние, т. е. они могут проявляться в различном соотношении относительно друг к другу или отсутствовать совсем. Например, при большом угле наклона роликового транспортёра относительного горизонта будет отсутствовать сопротивление качению или оно будет иметь минимальное значение, но при этом сопротивление трения скольжения по цилиндрическим рифлёным роликам вращающихся единиц будет максимальным. В данном случае показатели $F_{1ПСЕ}$ и $F_{2ПСЕ}$ также примут минимальное значение или будут отсутствовать.

В равенстве (1) к силам сопротивления, имеющим постоянное влияние на движение плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру, относятся: $F_{1ПСЕ}$, $F_{2ПСЕ}$, $F_{3ПСЕ}$, $F_{4ПСЕ}$ и $F_{5ПСЕ}$. Сопротивление движению плоской сплоточной единицы от трения в опорах роликов $F_{1ПСЕ}$ вращающихся единиц присутствует всегда и не зависит от вида движения плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру. Сопротивление движению плоской сплоточной единицы от её качения по цилиндрическим рифлёным роликам вращающихся единиц $F_{2ПСЕ}$ отсутствует в том случае, когда устанавливается большой угол наклона роликового транспортёра относительно горизонта. Сопро-

тивление движению плоской сплоточной единицы от её трения скольжения по цилиндрическим рифлёным роликам вращающихся единиц $F_{3ПСЕ}$ проявляется из-за разности скоростей роликов и плоской сплоточной единицы. Сопротивление движению плоской сплоточной единицы от силы инерции вращающихся единиц $F_{4ПСЕ}$ возникает в случае их разгона. Сила инерции сплоточной единицы $F_{5ПСЕ}$ возникает в результате неравномерного движения плоской сплоточной единицы по транспортёру, когда присутствует её ускорение. Из вышесказанного следует, что при построении математической модели движения плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру требуется учёт указанных сил.

Рассмотренные в равенстве (1) силы сопротивления движению плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру $F_{6ПСЕ}$, $F_{7ПСЕ}$ и $F_{8ПСЕ}$ имеют кратковременное влияние или отсутствуют полностью. Сопротивление движению плоской сплоточной единицы по коническим гладким роликам вращающихся единиц $F_{6ПСЕ}$ будет возникать преимущественно в случае перемещения плоской сплоточной единицы к борту наклонного роликового транспортёра или из-за перекоса данной сплоточной единицы на транспортёре. Указанное положение плоской сплоточной единицы на наклонном роликовом транспортёре в процессе её движения может не всегда проявляться. В противном случае происходит взаимодействие плоской сплоточной единицы с гладкими коническими роликами вращающихся единиц, где возникающее сопротивление будет иметь маленькое значение, которое существенно не повлияет на характер режима движения плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру. Сопротивление движению плоской сплоточной единицы от воздушной среды $F_{7ПСЕ}$ возникает при высокой скорости перемещения воздушных масс, которые могут воздействовать на переднюю, заднюю или боковые части сплоточной единицы. Так как в практических условиях воздействие воздушных масс на плоскую сплоточную единицу может протекать не постоянно, не обладать большими значениями, то во всех известных расчётах [21], [22] данное сопротивление не учитывается. Местное сопротивление движению плоской сплоточной единицы $F_{8ПСЕ}$ выражается в сопротивлении от неровности полотна транспортёра. Это происходит тогда, когда вращающиеся единицы не находятся в одной плоскости, например, предыдущая вращающаяся единица расположена ниже последующей вращающейся единицы, т. е. между ними образуется перепад по высоте, независимо от угла наклона роликового транспортёра. Так как в настоящее время предъявляются высокие требования к качеству изготовления роликовых транспортёров, то возникновение данного вида сопротивления не должно быть или оно будет иметь минимальное значение. На основании вышесказанного устанавливаем, что сопротивления $F_{6ПСЕ}$, $F_{7ПСЕ}$ и $F_{8ПСЕ}$ в дальнейшем не используются при построении математической модели движения плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру из-за малого их значения и не регулярного проявления.

Сопротивление движению плоской сплоточной единицы от трения в опорах вращающихся единиц $F_{1ПСЕ}$ рассчитывается из уравнения равновесия относительно каждой оси ролика [22], [28—35]:

$$F_{1ПСЕ} = K_{ТОР}\left(G_{ПСЕ} + G_{ВЕ}n_{ОР}\right)\frac{d_{ДП}}{d_{РРТ}}, \quad (2)$$

где $K_{ТОР}$ — коэффициент трения в опорах вращающихся единиц при движении; $G_{ПСЕ}$ — вес плоской сплоточной единицы, кН; $G_{ВЕ}$ — вес вращающейся единицы роликового транспортёра, кН; $n_{ОР}$ — количество опорных роликов; $d_{ДП}$ — диаметр подшипника оси вращающейся единицы, см; $d_{РРТ}$ — диаметр цилиндрического рифлёного ролика, см.

Так как эксплуатация роликового транспортёра осуществляется в тяжёлых условиях, то в уравнении (2) показатель $K_{ТОР}$, с учётом рекомендаций работы [22], принимается равным для подшипников качения 0,06, а для подшипников скольжения — 0,25:

$$G_{ПСЕ} = m_{ПСЕ}g;\ G_{ВЕ} = m_{ВЕ}g, \quad (3)$$

где $m_{ПСЕ}$ — масса плоской сплоточной единицы, т; g — ускорение свободного падения, м/с^2; $m_{ВЕ}$ — масса вращающейся единицы, т.

Количество опорных роликов $n_{ОР}$ устанавливается в зависимости от величины шага вращающихся единиц $t_{ВЕ}$ [36]:

$$t_{ВЕ} = -2L_{ПСЕ} + 2\left|\sqrt{1,5\left[L_{ПСЕ}^2 - 0,5L_{ПСЕ}H_{ПСЕ}i_{РТ}\right]}\right|, \quad (4)$$

где $L_{ПСЕ}$ — длина плоской сплоточной единицы, м; $H_{ПСЕ}$ — высота плоской сплоточной единицы, м; $i_{РТ}$ — уклон роликового транспортёра.

Анализ формулы (4) показывает, что при спуске плоских сплоточных единиц $t_{ВЕ} = \left(0,42....0,45\right)L_{ПСЕ}$, причём значение $L_{ПСЕ}$ принимается для наиболее коротких сплоточных единиц, а следовательно, при спуске по транспортёру сплоточная единица может опираться на два ролика и более:

$$n_{ОР} = \frac{L_{ПСЕ}}{t_{ВЕ}}. \quad (5)$$

В формуле (2) величины $K_{ТОР}$, $d_{ДП}$ и $d_{РРТ}$ характеризуют конструкцию роликов, а поэтому введём понятие коэффициента, учитывающего конструкцию ролика, $K_{КР}$:

$$K_{КР} = K_{ТОР}\frac{d_{ДП}}{d_{РРТ}}. \quad (6)$$

Подставим выражения (5) и (6) в уравнение (2) и получим:

$$F_{1ПСЕ} = K_{КР}\left(G_{ПСЕ} + \frac{L_{ПСЕ}}{t_{ВЕ}}G_{ВЕ}\right). \quad (7)$$

В полученной зависимости (7) вынесем $G_{ПСЕ}$ за скобки:

$$F_{1ПСЕ} = K_{КР}G_{ПСЕ}\left(1 + \frac{L_{ПСЕ}G_{ВЕ}}{t_{ВЕ}G_{ПСЕ}}\right). \quad (8)$$

Обозначим:

$$q_{ВЕ} = \frac{G_{ВЕ}}{t_{ВЕ}};\ q_{ПСЕ} = \frac{G_{ПСЕ}}{L_{ПСЕ}}, \quad (9)$$

где $q_{ВЕ}$ — погонный вес вращающихся единиц — величина, постоянная для конкретного транспортёра, кН/м; $q_{ПСЕ}$ — погонный вес плоской сплоточной единицы — величина, постоянная для плоских сплоточных единиц одной конструкции, одинаковой ширины и высоты, но разной длины, кН/м.

С учётом формул (9) зависимость (8) примет вид:

$$F_{1ПСЕ} = K_{КР}G_{ПСЕ}\left(1 + \frac{q_{ВЕ}}{q_{ПСЕ}}\right). \quad (10)$$

Сопротивление $F_{1ПСЕ}$, определяемое по зависимости (10), в большей степени зависит от показателя $K_{ТОР}$ и отношения $d_{ДП}$ к $d_{РРТ}$. Следовательно, при разработке роликовых транспортёров показатели $K_{ТОР}$ и $d_{ДП}$ следует уменьшать, а параметр $d_{РРТ}$ — увеличивать.

Используя закономерности движения цилиндрического катка по плоскости [22], [28], [30], [32—34], определим сопротивление движению плоской сплоточной единицы $F_{2ПСЕ}$ от её качения по цилиндрическим рифлёным роликам вращающихся единиц:

$$F_{2ПСЕ} = \frac{2K_{Д}K_{КТК}G_{ПСЕ}}{d_{РРТ}}\cos\alpha_{РТ}, \quad (11)$$

где $K_{Д}$ — коэффициент, учитывающий дополнительное сопротивление от неровностей опорных поверхностей плоских сплоточных единиц и сплоточного такелажа ($K_{Д} = 1,05...1,1$); $K_{КТК}$ — коэффициент трения качения плоских сплоточных единиц при движении по рифлёным роликам, см; $\alpha_{РТ}$ — угол наклона роликового транспортёра относительно горизонта, рад.

Обозначим:

$$K_{СК} = \frac{2K_{КТК}}{d_{РРТ}}, \quad (12)$$

где $K_{СК}$ — коэффициент сопротивления качению.

Значение $K_{КТК}$ составляет 0,03…0,04 см [28], [37]. С учётом зависимости (12) формула (11) примет вид:

$$F_{2ПСЕ} = K_Д K_{СК} G_{ПСЕ} \cos\alpha_{РТ}, \quad (13)$$

Из формул (12) и (13) следует, что увеличение параметра $d_{РРТ}$ обеспечивает снижение коэффициента $K_{СК}$ и соответственно сопротивления движению плоской сплоточной единицы $F_{2ПСЕ}$ от её качения по цилиндрическим рифлёным роликам вращающихся единиц.

Сопротивление от трения скольжения $F_{3ПСЕ}$, с учётом данных о трении скольжения бруса по наклонной плоскости [22], [29], [31], [32], [34], [35], будет рассчитываться следующим образом:

$$F_{3ПСЕ} = K_Д K_{КТС} G_{ПСЕ} \cos\alpha_{РТ}, \quad (14)$$

где $K_{КТС}$ — коэффициент трения скольжения.

Коэффициент трения скольжения $K_{КТС}$, приведённый в формуле (14), при условии, что цилиндрические ролики не вращаются (застопорены), принимается равным от 0,2 до 0,6 [29]. Нижний порог принимается, если древесина и цилиндрические ролики мокрые, а верхний порог — если древесина и цилиндрические ролики сухие. При вращении цилиндрических роликов, когда окружная скорость на ободе ролика равна скорости поступательного движения плоской сплоточной единицы $K_{КТС} = 0$, а следовательно, $F_{3ПСЕ} = 0$. В случае, когда окружная скорость на ободе ролика меньше скорости поступательного движения плоской сплоточной единицы, что имеет место при торможении цилиндрических роликов, в формуле (7) вместо коэффициента $K_{КТС}$ вводится коэффициент тормозной силы b ($0 \le b \le K_{КТС}$):

$$F_{3ПСЕ} = K_Д b G_{ПСЕ} \cos\alpha_{РТ}. \quad (15)$$

Сопротивление движению плоской сплоточной единицы от силы инерции вращающихся единиц роликового транспортёра возникает, когда происходит разгон вращающихся единиц, оно равно:

$$F_{4ПСЕ} = \frac{2 n_{ОР} J_{ВЕ} \varepsilon}{d_{РРТ}}, \quad (16)$$

где $J_{ВЕ}$ — момент инерции вращающейся единицы, кг·м^2; ε — угловое ускорение вращающейся единицы, с$^{-2}$.

В формуле (16) и далее диаметр цилиндрического ролика $d_{РРТ}$ в метрах.

Если принять вращающуюся единицу сплошным цилиндром массой $m_{ВЕ}$ с радиусом $0{,}5\, d_{РРТ}$, то

$$J_{ВЕ} = \frac{m_{ВЕ} d_{РРТ}^2}{8} = \frac{G_{ВЕ} d_{РРТ}^2}{8g}. \quad (17)$$

Угловое ускорение вращающейся единицы ε представляет собой отношение ускорения плоской сплоточной единицы a к радиусу цилиндрического рифлёного ролика [38], [39], равному $0{,}5\,d_{PPT}$:

$$\varepsilon = \frac{2a}{d_{PPT}} = \frac{2}{d_{PPT}} \frac{dv}{dt}, \tag{18}$$

где v — мгновенная скорость движения плоской сплоточной единицы, м/с; t — время, с.

С учётом формул (5), (17) и (18) зависимость (16) примет вид:

$$F_{4ПСЕ} = \frac{G_{BE} L_{ПСЕ}}{2gt_{BE}} \frac{dv}{dt} = \frac{q_{BE} L_{ПСЕ}}{2g} \frac{dv}{dt}. \tag{19}$$

Сила инерции плоской сплоточной единицы [22], [37—39] определяется по формуле

$$F_{5ПСЕ} = m_{ПСЕ} a = \frac{G_{ПСЕ}}{g} a = \frac{G_{ПСЕ}}{g} \frac{dv}{dt}. \tag{20}$$

Плоская сплоточная единица приводится в движение по наклонному роликовому транспортёру силой скатывания, равной [21]:

$$F_C = m_{ПСЕ} g \sin \alpha_{PT} = G_{ПСЕ} \sin \alpha_{PT}. \tag{21}$$

Уравнение движения плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру с учётом вышеизложенного имеет вид:

$$F_C = \sum F_{СПСЕ} = F_{1ПСЕ} + F_{2ПСЕ} + F_{3ПСЕ} + F_{4ПСЕ} + F_{5ПСЕ}. \tag{22}$$

Подставим формулы (21), (10), (13), (15), (19), (20) в уравнение (22):

$$\begin{aligned} G_{ПСЕ} \sin \alpha_{PT} = {} & K_{KP} G_{ПСЕ} \left(1 + \frac{q_{BE}}{q_{ПСЕ}}\right) + K_Д K_{СК} G_{ПСЕ} \cos \alpha_{PT} + K_Д b G_{ПСЕ} \cos \alpha_{PT} + \\ & + \frac{q_{BE} L_{ПСЕ}}{2g} \frac{dv}{dt} + \frac{G_{ПСЕ}}{g} \frac{dv}{dt}. \end{aligned} \tag{23}$$

Полученное уравнение разделим на $G_{ПСЕ}$, умножим на g и после преобразования получим уравнение движения плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру, в котором учитывается сопротивление от силы инерции вращающихся единиц роликового транспортёра:

$$g \sin \alpha_{PT} = g K_{KP} \left(1 + \frac{q_{BE}}{q_{ПСЕ}}\right) + g K_Д \left(K_{СК} + b\right) \cos \alpha_{PT} + \left(1 + \frac{q_{BE}}{2q_{ПСЕ}}\right) \frac{dv}{dt}. \tag{24}$$

В полученном уравнении (24) коэффициенты K_{KP}, $K_Д$, $K_{СК}$ и b принимаем постоянными.

Запишем уравнение (24) следующим образом:

$$\left(1+\frac{q_{BE}}{2q_{ПСЕ}}\right)dv = g\left\{\sin\alpha_{PT} - K_{KP}\left(1+\frac{q_{BE}}{q_{ПСЕ}}\right) - K_{Д}\left(K_{CK}+b\right)\cos\alpha_{PT}\right\}dt. \quad (25)$$

Обозначим постоянные коэффициенты уравнения (25) следующим образом:

$$A = 1+\frac{q_{BE}}{2q_{ПСЕ}};\ B = g\left\{\sin\alpha_{PT} - K_{KP}\left(1+\frac{q_{BE}}{q_{ПСЕ}}\right) - K_{Д}\left(K_{CK}+b\right)\cos\alpha_{PT}\right\}. \quad (26)$$

Уравнение (25) с коэффициентами *A* и *B* имеет вид:

$$Adv = Bdt. \quad (27)$$

В результате интегрирования получим:

$$Av = Bt + C_1, \quad (28)$$

где C_1 — постоянная интегрирования, определяемая при $t = 0$ в зависимости от начального значения скорости плоской сплоточной единицы v_0, т. е. при $t = 0$ $v = v_0$.

$$C_1 = Av_0. \quad (29)$$

Тогда уравнение (28) принимает вид:

$$Av = Bt + Av_0. \quad (30)$$

Из уравнения (30) найдём мгновенную скорость движения плоской сплоточной единицы v по наклонному роликовому транспортёру:

$$v = \frac{B}{A}t + v_0. \quad (31)$$

Интегрированием выражения (31) можно найти пройденный путь *S* плоской сплоточной единицей при спуске по наклонному роликовому транспортёру, при этом учитываем, что пройденный путь *S* представляет собой разность конечной координаты плоской сплоточной единицы в момент времени *t* и начальной координаты при $t = 0$.

$$S = \frac{B}{2A}t^2 + v_0 t. \quad (32)$$

Из уравнения (32) можно найти время *t*, затрачиваемое на преодоление расстояния *S*.

Производную скорости можно представить следующим образом:

$$\frac{dv}{dt} = v\frac{dv}{ds};\ v = \frac{ds}{dt}, \quad (33)$$

где *s* — координата плоской сплоточной единицы, м.

Уравнение (27) запишем в таком виде:

$$A\frac{dv}{dt} = B;\ Av\frac{dv}{ds} = B. \quad (34)$$

Из уравнения (34) имеем:

$$Avdv = Bds. \tag{35}$$

Интегрируем уравнение (35):

$$\frac{Av^2}{2} = Bs + C_2, \tag{36}$$

где C_2 — постоянная интегрирования, определяемая при $s = 0$ в зависимости от начального значения скорости плоской сплоточной единицы v_0, т. е. при $s = 0$ $v = v_0$.

$$C_2 = \frac{Av_0^2}{2}. \tag{37}$$

Тогда

$$\frac{Av^2}{2} = Bs + \frac{Av_0^2}{2}. \tag{38}$$

Преобразуем полученное уравнение (38) и выразим координату *s*:

$$s = \frac{A\left(v^2 - v_0^2\right)}{2B}. \tag{39}$$

Зависимость (39) связывает мгновенную скорость движения плоской сплоточной единицы v по наклонному роликовому транспортёру с её координатой *s*.

Если подставить зависимость (31) в формулу (39), то можно получить формулу (32), что подтверждает достоверность полученных зависимостей (31), (32) и (39).

Режим разгона плоской сплоточной единицы при спуске по наклонному роликовому транспортёру имеет место при $b = 0$, тогда коэффициент *B* равен:

$$B = g\left\{\sin\alpha_{PT} - K_{KP}\left(1 + \frac{q_{BE}}{q_{ПСЕ}}\right) - K_Д K_{CK}\cos\alpha_{PT}\right\}. \tag{40}$$

3. Результаты

Приведённая математическая модель движения плоской сплоточной единицы по наклонному роликовому транспортёру показывает, что на скорость движения сплоточной единицы по транспортёру и на продолжительность её спуска существенное влияние оказывают параметры роликового транспортёра, угол его наклона относительного горизонта, параметры спускаемых плоских сплоточных единиц и физические свойства древесины. Наибольший интерес представляет изучение влияния параметров наклонного роликового транспортёра и угла его наклона относительно горизонта на скорость движения плоской сплоточной единицы и на продолжительность её спуска. Для проведения исследования на основании разработанных компьютерных программ по автоматизации процесса сплава древесины

в плоских сплоточных единицах [40—42] разработана программа для ЭВМ «Математическое моделирование движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру» [43]. Данная компьютерная программа написана на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7 [44—46]. Интерфейс указанной программы представлен на рисунках 1 и 2. В качестве исследуемых сплоточных единиц выступали усовершенствованные плоские сплоточные единицы, защищённые патентами № 2777674 РФ [6], № 210485 РФ [7] и № 2777676 РФ [8].

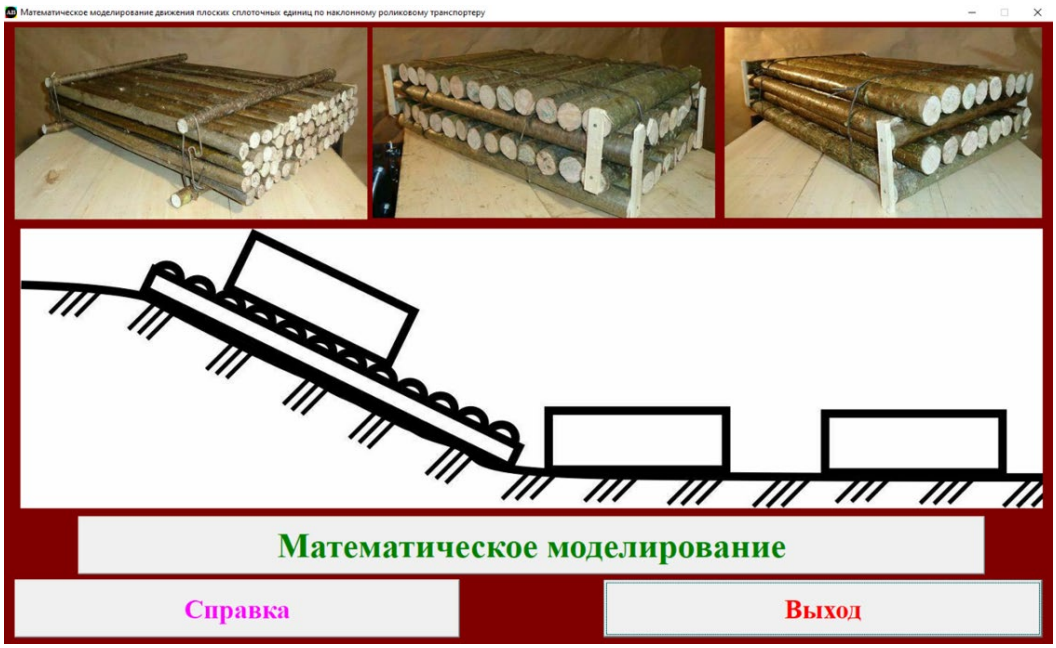


Рисунок 1. Интерфейс программы [43]

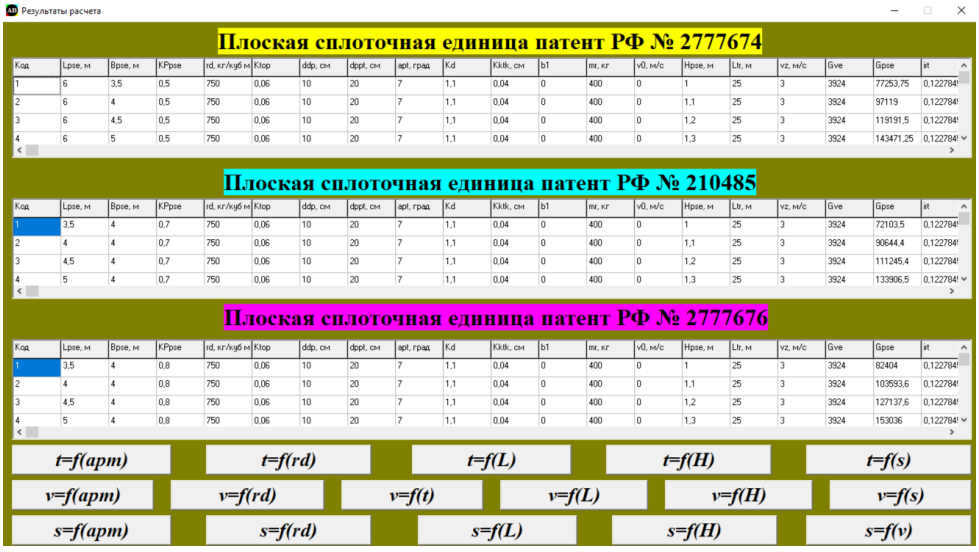
Figure 1. Interface of the program [43]

При исследовании влияния длины наклонного роликового транспортёра на конечную скорость движения усовершенствованных плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру и на продолжительность их спуска принимали следующие исходные данные: длина плоских сплоточных единиц L_{pse} 6 м; ширина плоских сплоточных единиц B_{pse} 4 м; высота плоских сплоточных единиц H_{pse} 1,5 м; плотность древесины r_d 750 кг/м^3; коэффициент трения в опорах вращающихся единиц при движении K_{TOP} 0,06; диаметр подшипника оси вращающейся единицы $d_{ДП}$ 10 см; диаметр цилиндрического рифлёного ролика d_{PPT} 20 см; угол наклона роликового транспортёра относительно горизонта α_{PT} 7º; коэффициент, учитывающий дополнительное сопротивление от неровностей опорных поверхностей плоских сплоточных единиц и сплоточного такелажа $K_{Д}$ 1,1; коэффициент трения качения плоских сплоточных единиц при движении по рифлёным роликам K_{KTK} 0,04 см; коэффициент тормозной силы b 0; масса вращающейся единицы m_r 400 кг; коэффициент

полнодревесности плоской сплоточной единицы, выполненной по патенту № 2777674 РФ, P_{Ppse} 0,5; коэффициент полнодревесности плоской сплоточной единицы, выполненной по патенту № 210485 РФ, P_{Ppse} 0,7; коэффициент полнодревесности плоской сплоточной единицы, выполненной по патенту № 2777676 РФ, P_{Ppse} 0,8. Начальная скорость движения плоской сплоточной единицы по транспортёру принималась равной нулю. При этом длина роликового транспортёра L_{tr} изменялась от 15 до 33 м с шагом 2 м. Результаты моделирования представлены на рисунках 3 и 4.



а



б

Рисунок 2. Интерфейс командной кнопки «Математическое моделирование»: *а* — форма ввода исходных данных; *б* — форма вывода результатов [рисунок автора]

Figure 2. Interface of the «Mathematical Modeling» command button: *а* — input data form; *б* — output results form

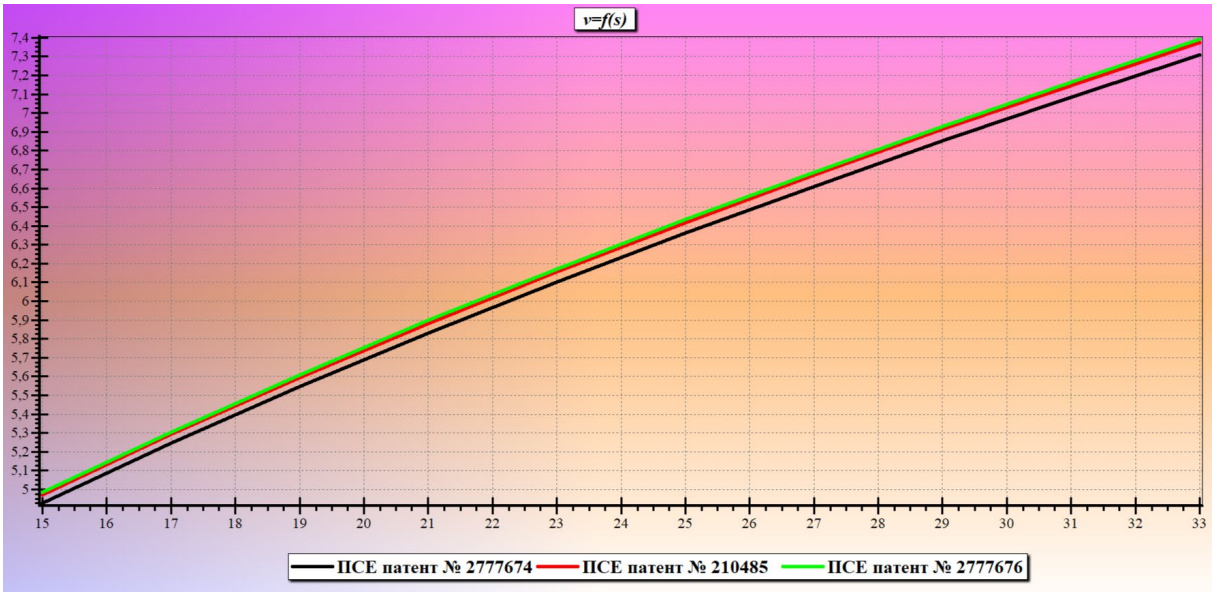


Рисунок 3. Графики зависимости конечной скорости движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру от его длины [рисунок автора]

Figure 3. Graphs of the dependence of the final speed of flat units moving along an inclined roller conveyor on its length

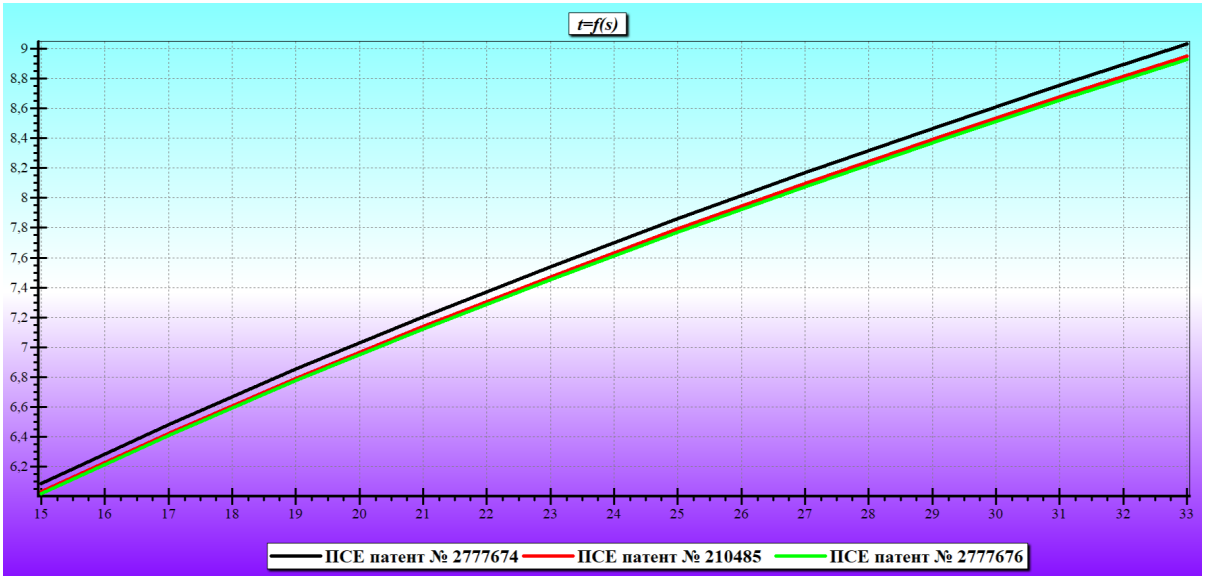


Рисунок 4. Графики зависимости продолжительности движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру от его длины [рисунок автора]

Figure 4. Graphs of the total duration of flat units movement along an inclined roller conveyor as a function of its length

На рисунке 3 представлены графики зависимости конечной скорости движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру от его длины, где их координаты изменяются по закону квадратичной функции, а графики представляют собой ветви параболы. При этом наибольшая конечная скорость движения присутствует у плоской сплоточной единицы (патент № 2777676 РФ), а наименьшую конечную скорость движения имеет другая плоская сплоточная единица (патент № 2777674 РФ). Это связано с тем, что масса плоской сплоточной единицы (патент № 2777676 РФ) больше массы плоской сплоточной единицы (патент № 2777674 РФ) при тех же геометрических параметрах и используемой древесине, а на массу плоских сплоточных единиц влияет их коэффициент полнодревесности. В соответствии с этим сила тяжести плоской сплоточной единицы (патент № 2777676 РФ) больше и сила скатывания для данной сплоточной единицы наибольшая, а следовательно, и её скорость в конце наклонного роликового транспортёра будет больше, чем у других плоских сплоточных единиц (патенты № 2777674 РФ и № 210485 РФ). Графики, представленные на рисунке 4, характеризуют зависимость продолжительности движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру от его длины. Координаты приведённых графиков изменяются по закону квадратичной функции, а сами графики представляют ветви параболы. Данные графики показывают, что наибольшую продолжительность движения по наклонному роликовому транспортёру имеет плоская сплоточная единица (патент № 2777674 РФ), а наименьшую продолжительность спуска — другая плоская сплоточная единица (патент № 2777676 РФ). Графики зависимостей, изображённые на рисунках 3 и 4, доказывают логическую связь о том, что чем больше скорость движения плоской сплоточной единицы в конце наклонного роликового транспортёра, тем меньше продолжительность её спуска. Данный фактор следует учитывать при организации спуска плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру, т. к. это влияет на интервал их движения по транспортёру, а в совокупности — и на производительность транспортёра.

При исследовании влияния угла наклона роликового транспортёра относительно горизонта на конечную скорость движения усовершенствованных плоских сплоточных единиц и на продолжительность их спуска исходные данные принимались аналогичные, как и при исследовании влияния длины наклонного роликового транспортёра на скорость движения данных сплоточных единиц и на продолжительность их спуска. Исключение составляют: длина роликового транспортёра L_{tr} и угол наклона роликового транспортёра относительно горизонта α_{PT}. Принимали длину роликового транспортёра L_{tr}, равную 25 м, а угол наклона роликового транспортёра относительно горизонта α_{PT} изменялся от 6º до 10,5º с шагом 0,5º. Результаты моделирования приведены на рисунках 5 и 6.

Изображённые на рисунке 5 графики зависимости конечной скорости движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру от его угла наклона относительно горизонта представляют ветви параболы, т. к. их координаты изменяются по закону квадратичной функции. Наибольшая конечная скорость движения присутствует у плоской

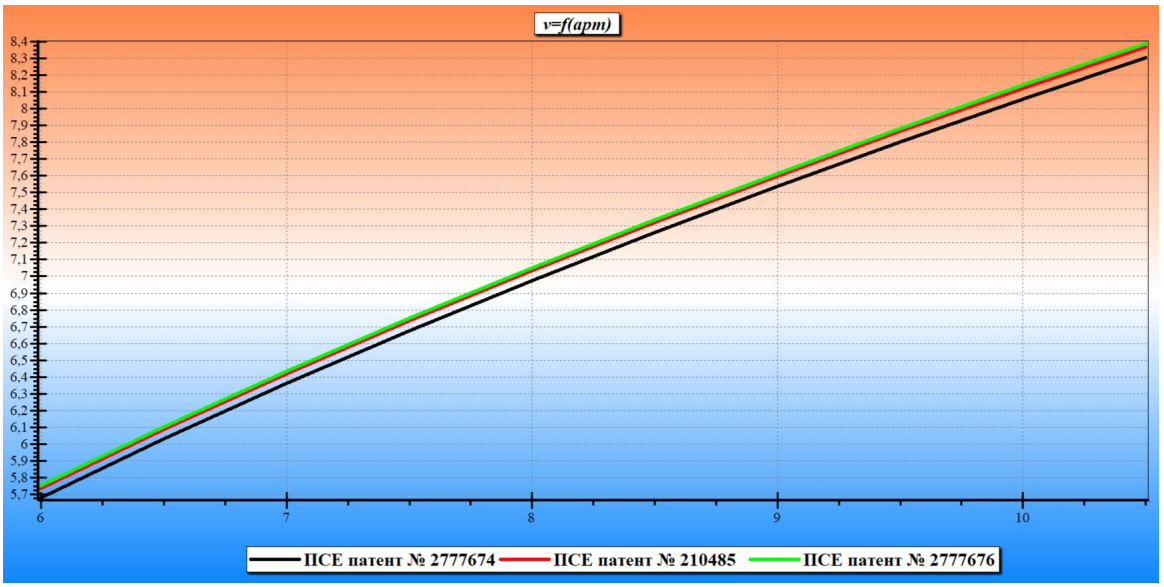


Рисунок 5. Графики зависимости конечной скорости движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру от его угла наклона относительно горизонта [рисунок автора]

Figure 5. Graphs of the dependence of the final speed of flat solid units movement on an inclined roller conveyor on its canting angle

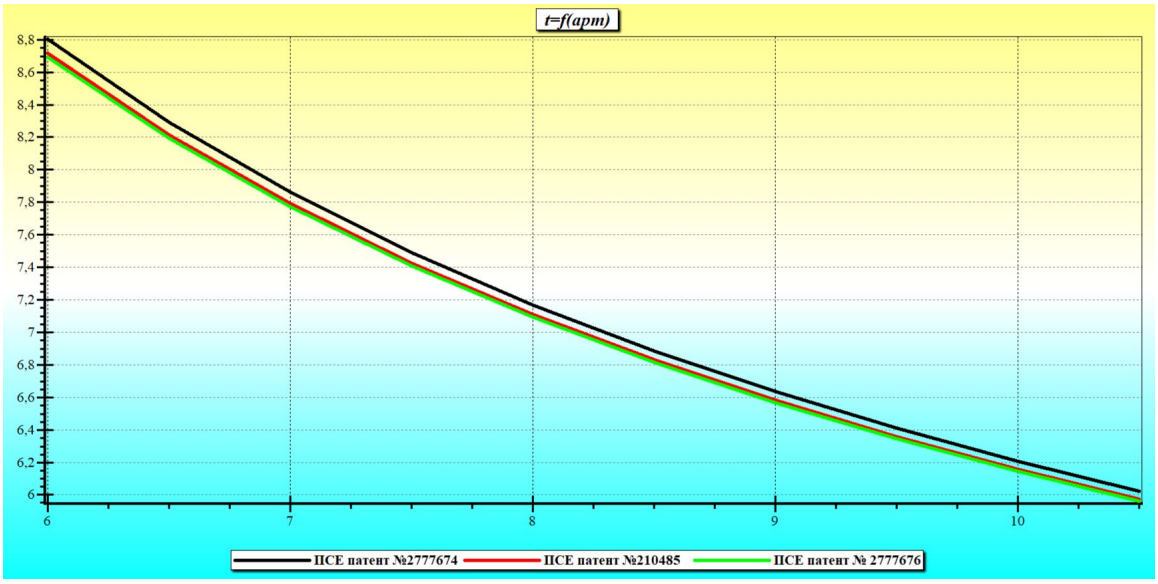


Рисунок 6. Графики зависимости продолжительности движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру от его угла наклона относительно горизонта [рисунок автора]

Figure 6. Graphs of the dependence of the total duration of flat solid units movement along an inclined roller conveyor on its canting angle

сплоточной единицы (патент № 2777676 РФ), а наименьшая — у другой плоской сплоточной единицы (патент № 2777674 РФ). Главной причиной появления наибольшей скорости движения в конце наклонного роликового транспортёра у плоской сплоточной единицы (патент № 2777676 РФ) является её более высокая масса по сравнению с другими плоскими сплоточными единицами (патенты № 2777674 РФ и № 210485 РФ). Следовательно, сила тяжести плоской сплоточной единицы (патент № 2777676 РФ) и соответственно скатывающая сила для данной сплоточной единицы будут наибольшими, а следовательно, и её скорость в конце наклонного роликового транспортёра будет больше, чем у других плоских сплоточных единиц (патенты № 2777674 РФ и № 210485 РФ). Анализируя подробно графики зависимости продолжительности движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру от его угла наклона относительно горизонта, приведённые на рисунке 6, можно утверждать, что они имеют гиперболический вид. Графики показывают, что наименьшую продолжительность спуска по наклонному роликовому транспортёру имеет плоская сплоточная единица (патент № 2777676 РФ), а наибольшую продолжительность спуска — другая плоская сплоточная единица (патент № 2777674 РФ). При этом следует отметить, что при увеличении угла наклона роликового транспортёра относительно горизонта продолжительность движения плоских сплоточных единиц сокращается, т. к. их конечная скорость движения при увеличении угла наклона роликового транспортёра возрастает в результате увеличения силы скатывания. Сокращение продолжительности спуска обеспечивает повышение производительности данного процесса, но при этом необходимо учитывать ограничение конечной скорости для безопасной остановки в конце спуска или для безаварийного входа плоской сплоточной единицы в воду.

4. Обсуждение и заключение

Представленная математическая модель движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру в однородной среде учитывает все основные сопротивления движению плоской сплоточной единицы при скатывании по наклонному роликовому транспортёру, а именно сопротивление от трения в опорах вращающихся единиц, сопротивление от качения по цилиндрическим рифлёным роликам вращающихся единиц, сопротивление от трения скольжения по цилиндрическим рифлёным роликам вращающихся единиц, сопротивление от силы инерции вращающихся единиц, силу инерции сплоточной единицы, что позволяет оценить влияние параметров транспортёра и плоских сплоточных единиц на характеристики спуска. Для реализации указанной математической модели разработана компьютерная программа (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026660874 РФ) на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7, позволяющая представлять результаты моделирования в виде графических зависимостей.

Полученные посредством реализации математической модели графические зависимости конечной скорости движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому

транспортёру и продолжительности их спуска от длины роликового транспортёра и его угла наклона показывают, что при увеличении длины роликового транспортёра конечная скорость движения плоских сплоточных единиц и продолжительность их спуска возрастают по закону квадратичной функции, а при увеличении угла наклона роликового транспортёра относительно горизонта конечная скорость движения плоских сплоточных единиц увеличивается, а продолжительность их спуска сокращается.

Анализ полученных графических зависимостей конечной скорости движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру и продолжительности их спуска от длины транспорта и угла его наклона относительно горизонта показал, что наибольшей конечной скоростью движения обладает плоская сплоточная единица, выполненная по патенту № 2777676 РФ, а продолжительность её спуска по наклонному роликовому транспортёру меньше, чем продолжительность спуска плоских сплоточных единиц, выполненных по патентам № 210485 РФ и № 2777676 РФ. Это обусловлено тем, что плоская сплоточная единица (патент № 2777676 РФ) имеет большую массу при тех же геометрических параметрах из-за более высокого коэффициента полнодревесности и, соответственно, более высокую силу скатывания, чем другие плоские сплоточные единицы (патенты № 210485 РФ и № 2777676 РФ).

Список литературы

1. Patent 111152892 A (CN), Int. Cl. B63B 35/00, B63H 20/12. Downstream transportation method for wood / S. Zhang, Y. Dai, Z. Gao, C. Fu, G. Ji, X. Li (CN). Patent holder UNIV LISHUI (CN). No. 202010034087.X; filed: 13.01.2020; date application 15.05.2020. 11 p.
2. *Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G.* Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18 (1.5), Austria, 2018. P. 765—772.
3. Brevet 2882723 FR, Int. CI.8 B63B 35/00, 3/08, 7/02. Embarcation modulaire pour le transport des grumes par voie d'eau / demandeur Roumengas Jonsa Guy; Mandataire SCHMITT. No. 0502132; la date de la demande 03.03.05; la date de parution 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
4. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов. Saarbrucken (Германия): Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 278 с.
5. Brevet 1461583 FR, Int. CI. B63b, B65g. Remorquage de billes de bois / société anonyme dite: compagnie maritime des chargeurs réunis résidant en France (Seine). No. 36,157; la date de la demandé 26.10.1965; la date de publié 02.10.1966. 4 p.
6. Патент № 2777674 Р. Ф., МПК B65B 35/02, B65G 69/20. Плоская сплоточная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, В. В. Абрамов, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021140068; заявл. 30.12.2021; опубл. 08.08.2022, Бюл. № 22. 8 с.
7. Патент № 210485 Р. Ф., МПК B63B 35/62. Плоская сплоточная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, В. В. Абрамов, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021125409; заявл. 19.10.2020; опубл. 18.04.2022, Бюл. № 11. 5 с.

8. Патент № 2777676 Р. Ф., МПК B65B 35/02. Плоская сплоточная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, В. В. Абрамов, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021140062; заявл. 30.12.2021; опубл. 08.08.2022, Бюл. № 22. 8 с.
9. Патент № 2853371 Р. Ф., МПК B65 B 35/02. Плоская сплоточная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, В. В. Абрамов, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2025119933; заявл. 18.07.2025; опубл. 23.12.2025, Бюл. № 36. 8 с.
10. Патент № 2836630 Р. Ф., МПК B63B 35/62. Плоская сплоточная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, В. В. Абрамов, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2024128260; заявл. 24.09.2024; опубл. 18.03.2025, Бюл. № 8. 9 с.
11. Патент № 240688 Р. Ф., МПК A01G 23/00, B63B 35/62. Плоская сплоточная единица / В. В. Васильев; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский ГАУ» (RU). № 2025123757; заявл. 28.08.2025; опубл. 22.01.2026, Бюл. № 3. 6 с.
12. *Васильев В. В.* Усовершенствованная сплоточная машина для изготовления плоской сплоточной единицы // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: Материалы междунар. научно-практич. конф., Россия, Воронеж, 25 февр. 2021 г.: В 2 ч. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2021. Ч. I. С. 130—134.
13. Патент № 2853254 Р. Ф., МПК B60P 3/41, B60 P1/52. Грузовая платформа / В. В. Васильев; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский ГАУ». № 2025114549; заявл. 29.05.2025; опубл. 22.12.2025, Бюл. № 36. 10 с.
14. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н., Лощенко А. В.* Грузовая платформа для изготовления и перевозки плоских сплоточных единиц // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы Национал. научно-практич. конф. (секция «Инновационные направления механизации и электрификации сельскохозяйственного производства»), г. Воронеж, 28 апр. 2023 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2023. Ч. V. С. 297—305.
15. *Васильев В. В.* Обоснование параметров транспортно-технологической схемы поставки древесины в плоских сплоточных единицах по принципу плот (линейка) — плот // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 2. С. 48—78. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5603.
16. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Использование плоских сплоточных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 1. С. 128—142. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142.
17. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н., Лощенко А. В.* Совершенствование технических средств для перемещения плоских сплоточных единиц // Проблемы и перспективы конструктивного совершенствования отечественного автомобилестроения: Материалы

Всерос. научно-техн. конф., г. Воронеж, 12 апр. 2023 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», 2023. С. 33—39.
18. Патент № 2803459 Р. Ф., МПК B65G 69/00. Способ спуска сплоточных единиц в водоём / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I». № 2022133702; заявл. 21.12.2022; опубл. 13.09.2023, Бюл. № 26. 7 с.
19. Патент № 216888 Р. Ф., МПК B21B 1/00, B65G 13/00. Роликовый транспортёр / Д. Н. Афоничев, А. Н. Беляев, В. В. Васильев; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I». № 2023100001; заявл. 01.01.2023; опубл. 06.03.2023. Бюл. № 7. 7 с.
20. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Технологические схемы формирования навигационных плотов на базе плоских сплоточных единиц // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения для АПК: Материалы Междунар. научно-практич. конф., Россия, г. Воронеж, 29 нояб. 2024 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2024. С. 32—37.
21. *Васильев В. В.* Математическое моделирование спуска плоских сплоточных единиц в водоём по береговой секции наклонного роликового транспортёра // Актуальные проблемы энергетики АПК в современной реальности: Материалы Междунар. научно-практич. конф., посвящённой основателю факультета энергетики и электрификации Валентину Васильевичу Фокину, г. Ижевск, 15 мая 2024 г. Ижевск: ФГБОУ ВО «Удмуртский ГАУ», 2024. С. 81—89. URL: https://udsau.ru/news/novosti/17699-aktualnye-problemy-energetiki-apk-v-sovremennoj-realnosti.html. Текст: электронный.
22. *Ивановский К. Е., Раковщик А. Н., Цоглин А. Н.* Роликовые и дисковые конвейеры и устройства. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
23. *McGuire P. M.* Conveyors application, selection, and integration. CRC Press, 2010. 182 p.
24. *Subba Rao D. V.* The belt conveyor: a concise basic course. CRC Press, 2020. 170 p.
25. *Fayed M. E., Skocir T. S.* Mechanical conveyors: selection and operation. CRC Press, 1996. 485 p.
26. Машины непрерывного транспорта / Под ред. В. И. Плавинского. М.: Машиностроение, 1969. 720 с.
27. Конвейеры: Справочник / Под общ. ред. Ю. А. Пертен. Л.: Машиностроение, 1984. 367 с.
28. *Яблонский А. А.* Курс теоретической механики. Ч. 2. Динамика. Изд. третье, испр. и доп. М.: Высш. шк., 1966. 411 с.
29. *Яблонский А. А., Никифорова В. М.* Курс теоретической механики. Ч. 1. Статика, кинематика. Изд. третье, испр. М.: Высш. шк., 1966. 439 с.
30. *Susskind L.* Classical mechanics: the theoretical minimum. Penguin Books Ltd, 2020. 256 p.
31. *Luscombe J. H.* Statistical mechanics; from thermodynamics to the renormalization group. CRC Press, 2021. 400 p.
32. *Kibble T. W. B., Berkshire F. H.* Classical mechanics, fifth edition. Imperial College Press, 2004. 478 p.
33. Engineering mechanics — dynamics / G. Gray [et al.]. Imperial College Press, 2010. 801 p.
34. Engineering mechanics: statics and dynamics. 3rd edition / M. E. Plesha [et al.]. McGraw Hill, 2023. 1521 p.
35. *Hibbeler R. C.* Engineering mechanics — statics. CRC Press, 2009. 655 p.

36. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Обоснование параметров роликового транспортёра для спуска плоских сплоточных единиц в водоём // Физические основы наукоёмких технологий в современном мире: Материалы Всерос. научно-метод. конф. с междунар. участием, посвящённой 80-летию со дня рождения профессора В. В. Постникова, приуроченной к 95-летию ВГЛТУ им. Г. Ф. Морозова, г. Воронеж, 15 апр. 2025 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2025. С. 110—119.
37. Теоретическая механика в примерах и задачах. Т. 1 (статика, кинематика). Изд. пятое, перераб. / Под ред. Г. Ю. Джанелидзе, Д. Р. Меркина. М.: Наука, 1967. 513 с.
38. *Лойцянский Л. Г., Лурье А. И.* Курс теоретической механики: В 2 т. Т. 1. Статика и кинематика. 8-е изд., перераб и доп. М.: Наука, 1982. 352 с.
39. *Николаи Е. Л.* Теоретическая механика. Ч. 1. Статика, кинематика. Изд. двадцатое, стереотип. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1962. 280 с.
40. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660074. Программа математического моделирования процесса спуска на воду плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру / В. В. Васильев; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский ГАУ» (RU); заявл. 19.04.2024, зарегистр. 02.05.2024.
41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618808. Программа математического моделирования процесса спуска на воду плоских сплоточных единиц / В. В. Васильев; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский ГАУ» (RU); заявл. 03.04.2024, зарегистр. 17.04.2024.
42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660776. Программа для планирования сплава древесины в плотах на базе плоских сплоточных единиц / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, Е. В. Поздняков; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU); заявл. 08.06.2022, зарегистр. 08.06.2022.
43. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026660874. Программа математического моделирования движения плоских сплоточных единиц по наклонному роликовому транспортёру / В. В. Васильев; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский ГАУ» (RU); заявл. 06.04.2026, зарегистр. 16.04.2026.
44. *Prasnikar D., Prasnikar N. J.* Delphi Thread Safety Patterns. Dark Neon, 2022. 324 p.
45. *Cantù M.* Delphi 2009 Handbook. Italy. Wintech Italia Srl, 2008. 400 p.
46. *Teti D.* Delphi Cookbook. Packt publishing, 2014. 332 p.

References

1. Zhang S., Dai Y., Gao Z., Fu C., Ji G., Li X. (CN). Patent 111152892 A (CN), IPC Cl. B 63 B 35/00, B 63 H 20/12. Downstream transportation method for wood. Patent holder UNIV LISHUI (CN). No. 202010034087.X; filed: 13.01.2020; date application 15.05.2020. 11 p.
2. Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G. Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft. *International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18 (1.5)*. Austria, 2018, pp. 765—772.

3. Patent No. 2882723 FR, Int. CI. B63B 35/00, 3/08, 7/02. Modular boat for the transport of logs by water. Applicant Roumengas Jonsa Guy; Agent SCHMITT. No. 0502132; the date of application 03.03.05; the date of publication 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
4. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. *Improved systems of raft timber alloy.* Saarbrucken (Germany), Publishing house LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 278 p. (In Russ)
5. Patent No. 1461583 FR, Int. IPC. B63B, B65g. Remorquage de billes de bois / société anonyme dite: compagnie maritime des chargeurs réunis résidant en France (Seine). No. 36,157; la date de la demandé 26.10.1965; la date de publié 02.10.1966. 4 p.
6. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent No. 2777674 R. F., IPC B65B 35/02, B65G 69/20. Flat splice unit. The applicant and the patent holder are the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov» (RU). No. 2021140068; application 30.12.2021; publ. 08.08.2022, Byul. No. 22. 8 p. (In Russ.)
7. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent No. 210485 R. F., IPC B63B 35/62. Flat splice unit. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov» (RU). No. 2021125409; application 19.10.2020; publ. 18.04.2022, Byul. No. 11. 5 p. (In Russ.)
8. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent No. 2777676 R. F., IPC B65B 35/02. Flat splice unit. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov» (RU). No. 2021140062; application 30.12.2021; publ. 08.08.2022, Byul. No. 22. 8 p. (In Russ.)
9. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent No. 2853371 R. F., IPC B65 B 35/02. Flat consolidation unit. Applicant and patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov» (RU). No. 2025119933; application 18.07.2025; publ. 23.12.2025, Byul. No. 36. 8 p. (In Russ.)
10. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent No. 2836630 R. F., IPC B63B 35/62. Flat consolidation unit. Applicant and patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov» (RU). No. 2024128260; application 24.09.2024; publ. 18.03.2025, Byul. No. 8. 9 p. (In Russ.)
11. Vasiliev V. V. Patent No. 240688 R. F., IPC A01G 23/00; B63B 35/62. Flat unit. Applicant and patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University» (RU). No. 2025123757; application 28.08.2025; publ. 22.01.2026, Byul. No. 3. 6 p. (In Russ.)
12. Vasiliev V. V. An improved cohesive machine for manufacturing a flat cohesive unit. *Trends in the development of technical means and technologies in the agroindustrial complex: Materials international Scientific and Practical Conference in 2 hours, Russia, Voronezh, February 25, 2021.* Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2021, part I, pp. 130—134. (In Russ.)
13. Vasiliev V. V. Patent No. 2853254 R. F., IPC B60P 3/41; B60 P1/52. Cargo platform. Applicant and patent holder of the Voronezh State Agrarian University. No. 2025114549; application 29.05.2025; publ. 22.12.2025, Byul. No. 36. 10 p. (In Russ.)
14. Vasilyev V. V., Afonichev D. N., Loshchenko A. V. Cargo platform for the manufacture and transportation of flat solid units. *Theory and Practice of Innovative Technologies in the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference (Section «Innovative Directions of Mechanization and Electrification of Agricultural Production»),*

Voronezh, April 28, 2023. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2023, part V, pp. 297—305. (In Russ.)
15. Vasiliev V. V. Substantiation of the parameters of the transport and technological scheme for the supply of wood in flat raft units according to the raft (ruler) — raft principle. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 48—78. doi: 10.15393/j2.art.2021.5603. (In Russ.)
16. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. The use of flat splice units on the initial timber alloy. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2022, no. 1, pp. 128—142. doi: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142. (In Russ.)
17. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Loshchenko A. V. Improvement of technical means for moving flat cohesive units. *Problems and prospects of constructive improvement of the domestic automotive industry: Materials All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, April 12, 2023.* Voronezh, Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov, 2023, pp. 33—39. (In Russ.)
18. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Patent No. 2803459 R. F., IPC B65G 69/00. Method for Lowering Floating Units into a Body of Water. Applicant and patent holder: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I. No. 2022133702; application 21.12.2022; publ. 13.09.2023, Byul. No. 26. 7 p. (In Russ.)
19. Afonichev D. N., Belyaev A. N., Vasiliev V. V. Patent No. 216888 R. F., IPC B21B 1/00, B65G 13/00. Roller conveyor. Applicant and patent holder of the Emperor Peter the Great Voronezh State Agrarian University. No. 2023100001; application 01.01.2023; publ. 06.03.2023. Byul. No. 7. 7 p. (In Russ.)
20. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Technological schemes for the formation of navigation rafts based on flat rafting units. *Science and Education at the Current Stage of Development: Experience, Problems, and Solutions for the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Russia, Voronezh, November 29, 2024.* Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2024, pp. 32—37. (In Russ.)
21. Vasiliev V. V. Mathematical modeling of the descent of flat cohesive units into a reservoir along the coastal section of an inclined roller conveyor. *Actual problems of agricultural energy in modern reality: Materials of the international scientific and practical conference dedicated to the founder of the Faculty of Energy and Electrification Valentin Vasilyevich Fokin; Izhevsk, May 15, 2024.* Izhevsk, Udmurt State Agrarian University, 2024. pp. 81—89. Available at: https://udsau.ru/news/novosti/17699-aktualnye-problemy-energetiki-apk-v-sovremennoj-realnosti.html. Text. Image: electronic. (In Russ.)
22. Ivanovsky K. E., Rakovshchik A. N., Tsoglin A. N. *Roller and disc conveyors and devices*. Moscow, Mashinostroenie, 1973. 216 p. (In Russ.)
23. McGuire P. M. *Convevors application, selection, and integration.* CRC Press, 2010. 182 p.
24. Subba Rao D. V. *The belt conveyor: a concise basic course.* CRC Press, 2020. 170 p.
25. Fayed M. E., Skocir T. S. *Mechanical conveyors: selection and operation.* CRC Press, 1996. 485 p.
26. *Continuous transport machines* / edited by V. I. Plavinsky. Moscow, Mashinostroenie, 1969. 720 p. (In Russ.)
27. *Conveyors: handbook* / edited by Yu. A. Perten. Leningrad, Mashinostroenie, 1984. 367 p. (In Russ.)
28. Yablonsky A. A. *Course of theoretical mechanics*. *Part 2. Dynamics*. 3rd edition, revised and expanded. Moscow, Vysshaya Shkola, 1966. 411 p. (In Russ.)
29. Yablonsky A. A., Nikiforova V. M. *Course of Theoretical Mechanics*. *Part 1. Statics, kinematics*. 3rd edition, revised. Moscow, Vysshaya Shkola, 1966. 439 p. (In Russ.)
30. Susskind L. *Classical mechanics: the theoretical minimum.* Penguin Books Ltd, 2020. 256 p.

31. Luscombe J. H. *Statistical mechanics; from thermodynamics to the renormalization group*. CRC Press, 2021. 400 p.
32. Kibble T. W. B., Berkshire F. H. *Classical mechanics.* Fifth edition. Imperial College Press, 2004. 478 p.
33. Gray G. [et al.]. *Engineering mechanics — dynamics*. Imperial College Press, 2010. 801 p.
34. Plesha M. E. [et al.]. *Engineering mechanics: statics and dynamics*. 3rd edition. McGraw Hill, 2023. 1521 p.
35. Hibbeler R. C. *Engineering mechanics — statics.* CRC Press, 2009. 655 p.
36. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Substantiation of the parameters of a roller conveyor for launching flat cohesive units into a reservoir. *Physical foundations of high-tech technologies in the modern world: Materials of the All-Russian Scientific and Methodological conference with international participation dedicated to the 80th anniversary of the birth of Professor V. V. Postnikov, dedicated to the 95th anniversary of the All-Russian State Technical University named after G. F. Morozov, Voronezh, April 15, 2025.* Voronezh, VGLTU, 2025, pp. 110—119. (In Russ.)
37. *Theoretical mechanics in examples and problems*. *Vol. 1 (statics, kinematics)*. Fifth edition, revised / Edited by G. Yu. Dzhanelidze and D. R. Merkin. Moscow, Nauka, 1967. 513 p. (In Russ.)
38. Loitsiansky L. G., Lurie A. I. *Course of theoretical mechanics: In 2 volumes. Vol. 1. Statics and kinematics*. 8th edition, revised and expanded. Moscow, Nauka, 1982. 352 p. (In Russ.)
39. Nikolaï E. L. *Theoretical Mechanics. Part 1. Statics, kinematics.* 20th stereotyped edition. Moscow, FIZMATGIZ, 1962. 280 p. (In Russ.)
40. Vasiliev V. V. Certificate of state registration of the computer program No. 2024660074. Mathematical modeling program for launching flat solid units onto an inclined roller conveyor; the applicant and the copyright holder is the «Voronezh State Agrarian University» (RU). Claimed on 19.04.2024, registered on 02.05.2024. (In Russ.)
41. Vasiliev V. V. Certificate of state registration of the computer program No. 2024618808. Mathematical modeling program for launching flat units; the applicant and the copyright holder is the «Voronezh State Agrarian University» (RU). Claimed on 03.04.2024, registered on 17.04.2024. (In Russ.)
42. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Pozdnyakov E. V. Certificate of state registration of the computer program No. 2022660776. The program for planning wood alloy in flat cohesive units; the applicant and the copyright holder is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov» (RU). Claimed on 08.06.2022, registered on 08.06.2022. (In Russ.)
43. Vasiliev V. V. Certificate of state registration of the computer program No. 2026660874. Mathematical modeling program for the movement of flat solid units on an inclined roller conveyor; the applicant and the copyright holder is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great» (RU). Claimed on 06.04.2026, registered on 16.04.2026. (In Russ.)
44. Prasnikar D., Prasnikar N. J. *Delphi Thread Safety Patterns.* Dark Neon, 2022. 324 p.
45. Cantù M. *Delphi 2009 Handbook.* Italy, Wintech Italia Srl, 2008. 400 p.
46. Teti D. *Delphi Cookbook.* Packt publishing, 2014. 332 p.