

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4482

Обзор

## АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН С ПОЧВОГРУНТАМИ ЛЕСОСЕК

Владимир Е. Божбов<sup>1</sup>, Игорь В. Григорьев<sup>2\*</sup>, Сергей Е. Рудов<sup>3</sup>, Елена В. Тетеревлева<sup>4</sup>, Юлия М. Чемшикова<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5; E-Mails: [ntobumdrevprom@mail.ru](mailto:ntobumdrevprom@mail.ru) (Евгений Божбов)

<sup>2</sup> Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Россия, 677007, г. Якутск, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3; E-Mails: [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru) (Игорь Григорьев)

<sup>3</sup> Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого, Россия, 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий просп., д. 3, К-64, E-Mails: [89213093250@mail.ru](mailto:89213093250@mail.ru) (Сергей Рудов)

<sup>4</sup> Ухтинский государственный технический университет, Россия, 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13, E-Mails: [teterevleva.elena.v@mail.ru](mailto:teterevleva.elena.v@mail.ru) (Елена Тетеревлева), [chemshikova79@mail.ru](mailto:chemshikova79@mail.ru) (Юлия Чемшикова)

\* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru) (Игорь Григорьев);  
Tel.: +7-921-751-3866

*Получена: 13 марта 2019 / Принята: 29 апреля 2019 / Опубликовано: 10 июня 2019*

---

**Аннотация:** Работа лесных машин на различных технологических операциях, включая трелевку, — один из важнейших и наиболее ресурсоёмких этапов в лесозаготовительном производстве. От того, насколько рационально организована работа лесных машин, во многом зависят показатели деятельности всего лесозаготовительного процесса. При этом уже на стадии проектирования технологического процесса необходима оценка эффективности работы лесных машин (производительность, экологичность, эргономичность и т. д.) исходя из комплекса факторов: состава парка машин, условий работы, показателей самого процесса работы (среднее расстояние перемещения, рейсовая нагрузка). Сведения об основных показателях процесса работы колёсных лесных машин, сравнительно недавно получивших распространение в России, зачастую недостаточно точно отражают сложные взаимосвязи параметров лесной машины, рейсовой нагрузки, почвенно-грунтовых условий лесосеки с эффективностью их работы. В частности, наблюдается недостаток в моделях для практической оценки проходимости и производительности колёсных лесных машин исходя из конкретных природно-производственных условий. Указанное затрудняет выработку

практических рекомендаций, направленных на дальнейшее совершенствование выбора колёсных лесных машин для конкретных природно-производственных условий работы предприятия. На настоящий момент в теории лесозаготовительного производства можно отметить недостаток работ, направленных на выявление нелинейного влияния нагрузки со стороны двигателя на сопротивление почвогрунта передвижению машины и показатели сцепления. Существующие методики расчёта, в основном, учитывают силы сопротивления и сцепления при помощи односложных коэффициентов без привязки к параметрам машины и величине нагрузки. Общие вопросы движения машин с колёсными двигателями по бездорожью рассмотрены в теории движения вездеходных средств, однако адаптация этих результатов применительно к задачам лесозаготовительного комплекса требует отдельных исследований.

**Ключевые слова:** колёсные лесные машины, почвогрунты, уплотнение, колееобразование.

---

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4482

*Review*

## **ANALYSIS OF APPROACHES TO THE DESCRIPTION OF PROCESSES OF INTERACTION OF THE PROPULSION OF FOREST MACHINES WITH THE SOIL ON THE CUTTING AREA**

**Vladimir Bozhbov<sup>1</sup>, Igor Grigorev<sup>2\*</sup>, Sergey Rudov<sup>3</sup>, Elena Teterevleva<sup>4</sup>, Yuliya Chemshikova<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Saint-Petersburg state forest technical University named after S. M. Kirov, Russia, 194021, St. Petersburg, Institutskoj., 5; E-Mails: ntobumdrevprom@mail.ru (Eugene Bozhbov)

<sup>2</sup> Yakut state agricultural Academy, Russia, 677007, Yakutsk, sh. Sergelyakhskoe, 3 km, building 3; E-Mails: silver73@inbox.ru (Igor Grigorev)

<sup>3</sup> Military Academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, Russia, 194064, St. Petersburg, Tikhoretskiy Prospekt, 3; K-64; E-Mails: 89213093250@mail.ru (Sergey Rudov)

<sup>4</sup> Ukhta state technical University, Russia, 169300, Komi Republic, Ukhta, Pervomayskaya St., 13, E-Mail: teterevleva.elena.v@mail.ru (Elena Teterevleva), chemshikova79@mail.ru (Yulia Chemshikova)

\* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: silver73@inbox1.ru (Igor Grigorev);  
Tel.: +7-921-751-3866

*Received: 13 March 2019 / Accepted: 29 April 2019 / Published: 10 June 2019*

---

**Abstract:** Forest machines performance of various technological operations, including skidding is one of the most important and most resource-intensive indicators in logging production. Rationally organized forestry machines operation largely affects the performance indicators of the entire logging process. Therefore at the design stage of the technological process it is necessary to assess the efficiency of forest machines operation (productivity, environmental friendliness, ergonomics, etc.) by using a set of factors: the composition of the machines fleet, working conditions, indicators of the work process (average travel distance, truck load). Data on the main indicators of the process of work of wheeled forest machines, which have recently become widespread in Russia, often do not accurately reflect the complex relationship between the parameters of the forest machine, truck load, soil and soil conditions of the cutting area and the efficiency of machine work. In particular, there is a lack of models for practical assessment of wheeled forest machines roadability and performance in specific natural and industrial conditions. This hinders development of practical recommendations aimed at further improving the choice of wheeled forest machines for specific natural and industrial conditions of the enterprise. At the moment there are few theoretical works aimed at identifying the nonlinear effect of the mover load on the soil resistance and adhesion indicators. The existing methods of calculation mainly take into account the forces of resistance and adhesion using single coefficients without any reference to the parameters of the machine and the magnitude of the load. General questions of movement of cars with wheel movers on off-road are considered in the theory of movement of cross-country vehicles; however,

adaptation of these results in relation to problems of a logging complex requires separate research.

**Keywords:** wheeled forestry machines, soils, compaction, rutting.

---

## 1. Введение

Решающее влияние на возможность движения лесной машины оказывают физико-механические свойства поверхности движения (почвенно-грунтовой поверхности, по которой движется машина) и характеристики ходовой части машины. При этом нужно отметить, что показатели проходимости зависят от показателей взаимодействия пары «машина + основание» и определяются, таким образом, как свойствами основания, так и характеристиками лесной машины [1—4].

Для оценки проходимости лесных машин с различными конструктивными параметрами ходовой части необходимо знать не зависящие от конструкции лесной машины параметры, характеризующие физико-механические свойства поверхностей движения, которые вне дорог в общем случае образуются верхним слоем поверхности земли.

Поверхностями для движения лесных машин являются грунтовые дороги, естественные и специально подготовленные почвенногрунтовые и заснеженные поверхности [4].

Среди основных факторов, затрудняющих движение машин по этим поверхностям, являются недостаточная прочность верхнего слоя и неровность поверхности движения, наличие препятствий в виде залегающих на небольшой глубине корней деревьев, камней, кочек, валежника, пней [4], [5].

Грунты в целом (в общем случае под грунтами понимают широкий спектр поверхностей движения: почвы, грунты, заснеженные поверхности и проч.) и лесные почвогрунты, в частности, относятся к дисперсным средам [6], [7]: твёрдые частицы в них занимают лишь часть объёма (в отличие от сплошных сред), при этом связи между отдельными частицами значительно менее прочные, по сравнению с материалом самих частиц.

При действии нагрузки со стороны движителя лесной машины в грунтах в первую очередь происходит относительное перемещение и сдвиг отдельных частиц [6].

Механические свойства лесных почвогрунтов определяются их гранулометрическим составом (величиной отдельных частиц), процентным содержанием органического вещества, влажностью, плотностью, пористостью и наличием дернового покрова [8].

## 2. Материалы и методы

Гранулометрический состав можно считать наиболее стабильной характеристикой почвогрунта [4], [5]. Влажность, плотность и пористость, также как и дерновый покров, под действием метеорологических условий меняются в широких пределах [8]. В зависимости от гранулометрического состава и свойств твёрдых частиц грунты подразделяют на связные, несвязные и заболоченные (таблица 1) [2].

К связным грунтам принято относить грунты с большим содержанием глинистых частиц [7]. Их состояние, а также механические свойства можно характеризовать влажностью. При малой влажности грунты находятся в твёрдом состоянии и отличаются значительной прочностью. При увеличении влажности до некоторого предела почвогрунты становятся

пластичными (этот предел также называют пределом пластичности), а при максимальном водонасыщении переходят в текучее состояние (предел текучести). Разность влажности на пределе текучести и пределе пластичности называется числом пластичности [7].

**Таблица 1.** Классификация грунтов в зависимости от гранулометрического состава и свойств твёрдых частиц [2].

**Table 1.** Classification of soils depending on particle size distribution and properties of solid particles [2].

Грунт	Содержание глинистых частиц в процентах	Число пластичности
Лёгкий суглинистый	3—12	0—7
Суглинистый	12—18	7—10
Тяжёлый суглинистый	18—25	10—15
Глинистый	> 25	> 15

При этом отношение текущей влажности грунта к влажности, соответствующей пределу текучести, называют также относительной влажностью [7].

Относительная влажность является важнейшим показателем, характеризующим связный грунт. Заметное уплотнение связных почвогрунтов под внешним воздействием происходит только при относительной влажности в диапазоне 0,4—0,65. При увеличении относительной влажности выше 0,65 показатели прочностных и механических свойств почвогрунта снижаются, что приводит к быстрому развитию деформаций сдвига, наблюдается срез и выдавливание слоев почвогрунта, деформации осевого сжатия при этом незначительны [7].

Для связных почвогрунтов характерна малая фильтрационная способность, поэтому они сравнительно медленно намокают и высыхают [7].

Ещё одной важной особенностью связных грунтов является то, что развитие деформаций в них в значительной мере определяется временем действия нагрузки [7—11].

В мягкопластичном состоянии связные почвогрунты обладают значительной липкостью [2], что также следует учитывать при описании процессов взаимодействия движителей лесных машин с ними. Представление о числовых характеристиках липкости грунтов можно получить с использованием данных таблицы 2.

Связные грунты занимают большую часть лесопокрытой поверхности РФ [1], они отличаются многообразием как по гранулометрическому составу (глинистые, тяжелосуглинистые, суглинистые, легкосуглинистые), так и по степени уплотнения и задернения. При выпадении осадков наибольшему увлажнению подвержены рыхлые грунты, меньшему — задернованные и плотно укатанные грунты (грунтовые дороги).

Принципиально то, что обеспечение проезда лесных машин по связным грунтам весной сложнее, чем осенью, поскольку осенью несущая способность грунта и прочие его

прочностные свойства уменьшаются по мере накопления влаги постепенно, при этом весной просачиванию воды в глубь грунта и, как следствие, высыханию, мешает промёрзший слой, грунт при этом уже насыщен жидкостью, а его влажность дополнительно увеличивается за счёт поступления талой и дождевой воды [2].

**Таблица 2.** Экспериментальные данные о липкости грунтов [2].

**Table 2.** Experimental data on the stickiness of the soil [2].

Грунт	Липкость (кПа) при относительной влажности				
	0,7	0,8	0,9	1	1,1
Супесь	5	12	18	8	5
Лёссы	20	30	47	40	28
Лугово-болотная почва	14	23	45	54	38
Чернозём	8	40	50	58	48

Несвязные почвогрунты характеризуются относительно большими размерами твёрдых частиц (низкое содержание глинистых части). Состояние песчаных грунтов характеризуется, в основном, их плотностью. Этот показатель оказывает наиболее заметное влияние на механические свойства несвязных почвогрунтов. Плотность грунта связана со значениями пористости и объёмного веса [7]. Несвязные грунты легко деформируются за счёт сдвиговых напряжений [7].

При увеличении влажности сопротивляемость несвязных грунтов деформированию сначала несколько увеличивается, но при достижении предела текучести вновь начинает снижаться [7].

Для несвязных грунтов характерна высокая фильтрационная способность, такие почвогрунты быстро намокают и быстро высыхают [7]. Их показатели, характеризующие деформативность, мало зависят от времени действия нагрузки. Проходимость лесных машин по песчаным грунтам существенно повышается при наличии мощного дернового слоя, а также при уменьшении толщины несвязного слоя.

Заболоченные почвогрунты находятся в переувлажнённом состоянии, в них присутствуют влаголюбивая растительность, значительное количество органических веществ, образующих слои торфа [12]. Торф отличается высокой пористостью и низким сопротивлением сжатию. Заболоченные грунты и болота занимают значительную территорию в северной и центральной полосах Европы и Азии, в Восточной и Центральной Сибири они составляют приблизительно 20 % площади [1].

По дорожной классификации заболоченные грунты подразделяют на три вида [1]:

1. Сплошные, у которых торф располагается непосредственно на минеральном слое.
2. Сапропелевые, имеющие под торфяным слоем органический или полуорганический ил.

3. Сплавинные, у которых торфяной слой плавает на воде.

Механические свойства заболоченных почвогрунтов, определяющие возможность движения по ним лесной машины, определяются прочностью и толщиной дернового слоя. Сведения о механических свойствах заболоченных грунтов представлены в таблице 3.

**Таблица 3.** Механические свойства заболоченных грунтов [1].

**Table 3.** Mechanical properties of wetlands [1].

Характеристика дернового покрова	Толщина дернового покрова, см	Удельное сопротивление грунта срезу, кПа	Модуль деформации, кПа
Сфагновые мхи: без кустарника	33,5—38,5	25—28	260—290
с кустарником	35—36	35—42	360 – 430
Гипновые мхи: без кустарника	27—28	18—21	186—215
с кустарником	27	28—34	290—340
Осоковый с развитыми осоковыми кочками	35—42	103—145	1050—1580
С межкочечными понижениями	10—11	14—24	143—244
Берёзово-лесной в межкочечных понижениях	5—5,5	14—60	86—143
Сфагновый торф (степень разложения 35—40 %, влажность 180 %)	—	54	544
Гипново-осоково- лесной	38—42	63—100	650—1430
Осоково-лесной торф	—	67	670

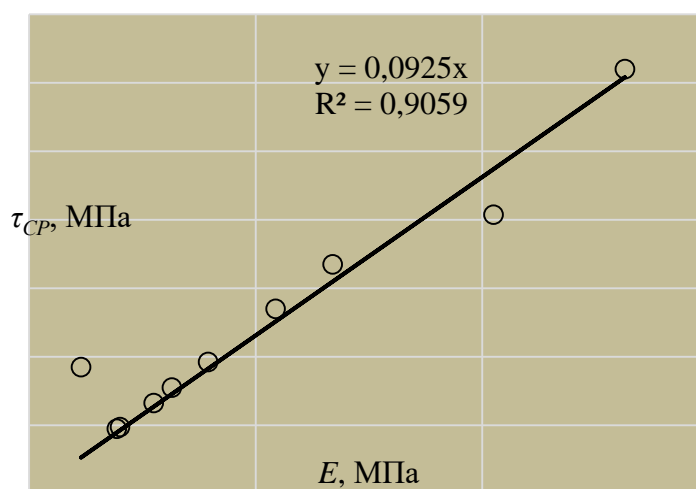
Данные таблицы 3 представлены в виде графика на рисунке 1.

Зависимость удельного сопротивления заболоченного грунта срезу от модуля деформации можно представить следующей формулой:

$$\tau_{CP} = 0,0925E, \quad (1)$$



Зависимость (1.8) получена на основании анализа данных о механических свойствах заболоченных грунтов. Обращает на себя внимание удовлетворительная сходимость расчётных данных с экспериментальными безотносительно типа поверхности. Это в сумме с диапазоном изменения модуля деформации даёт основание в первом приближении распространить зависимость (1.8) на случай описания процессов деформирования лесных почвогрунтов.



**Рисунок 1.** Зависимость сопротивления грунта срезу  $\tau_{CP}$  от модуля деформации  $E$  (заболоченные грунты)

**Picture 1.** The dependence of the resistance of the soil slice  $\tau_{CP}$  from deformation modulus  $E$  (wetland soils)

В ряде работ [13—15] использована классификация лесных почвогрунтов по механическим свойствам (таблица 4).

В таблице 4 использованы обозначения:  $E$  — модуль деформации почвогрунта,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $C$  — внутреннее сцепление,  $\varphi$  — угол внутреннего трения,  $\rho_0$  — плотность естественного сложения,  $H$  — толщина деформируемого слоя (глубина распространения деформаций сжатия).

Неровности грунтовых поверхностей можно подразделить на следующие группы [4]:

1. Уклоны. Земная поверхность с уклонами  $6$ — $17^\circ$  составляет около  $23\%$ , а с уклонами более  $17^\circ$  — около  $19\%$ . Среднее значение крутизны оврагов оценивается в  $10$ — $15^\circ$ .

2. Барьерные препятствия. Их профиль описывается сочетанием наклонных и ступенчатых линий (коротких уклонов и порогов). К ним относятся дорожные насыпи ( $10$ — $15\%$  насыпей имеют крутизну  $20$ — $34^\circ$  и высоту  $1,5$ — $3,0$  м, остальные — меньшие крутизну и высоту);

ирригационные и мелиоративные каналы, придорожные кюветы. Рвы с крутизной скатов более 45° выделяются в самостоятельную группу.

3. Дискретные препятствия. К ним относятся пни, кочки, валуны, корни деревьев и т. д.

**Таблица 4.** Классификация лесных почвогрунтов по механическим свойствам.

**Table 4.** Classification of forest soils by mechanical properties.

Параметры	Категории почвогрунта		
	I	II	III
$E$ , МПа	0,4	1	3
$\nu$	0,35	0,25	0,15
$C$ , кПа	5	12	24
$\varphi$ , град	11	15	16
$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	750	850	950
$H$ , м	0,8	0,4	0,3

Перечисленные неровности вызывают как снижение скорости движения лесных машин, так и застревание (полную потерю проходимости). Поэтому все их можно назвать препятствиями. Кроме того, встречаются многочисленные неровности, вызывающие снижение скорости движения из-за существенных динамических нагрузок и колебаний лесной машины. В зависимости от длины такие неровности условно разделяют на три группы [4], [16]:

1. Импульсные с длиной до 0,3 м.
2. Выбоины, имеющие длину 0,3—6,0 м.
3. Ухабы, длина которых 6—25 м.

В зависимости от высоты неровностей различают:

1. Шероховатости (высота до 1 см).
2. Впадины.
3. Выступы (высота 1—30 см).

Неровности с высотой более 30 см относят к препятствиям.

В зависимости от характера размещения рассматривают следующие типы неровностей [4], [16], [17]:

1. Периодически чередующиеся неровности.
2. Обособленные неровности.
3. Случайный микропрофиль.

Причём важно отметить, что речь может идти не только и не столько о препятствиях на поверхности почвогрунта лесосеки (их машина может обойти), сколько о корнях деревьев. Известно, что глубина колеи находится в тесной зависимости с физико-механическими свойствами поверхности движения и суммарным весом машины. При этом корни деревьев могут залегать на сравнительно небольшой глубине. Таким образом, при движении

форвардера крупные корни деревьев могут становиться препятствиями, в результате встречи с которыми возможна потеря проходимости машины. Это обстоятельство дополнительно подкрепляет утверждение о необходимости дальнейших исследований в области взаимодействия движителей колёсных машин с почвогрунтами лесосек.

### 3. Результаты

Для оценки деформации лесных почвогрунтов под воздействием движителей машин пользуются модулями, разработанными в рамках механики грунтов и теории движения автомобиля [1].

На рисунке 2 приведены зависимости погружения штампа в грунт от нагрузки.

Вертикальная деформация грунта  $h$  существенно зависит от площади вдавливаемого штампа  $F$  (рисунок 3).

Глубина погружения штампа в грунт зависит не только от его площади и нагрузки, но и от соотношения длины и ширины штампа (рисунок 4). Для большинства грунтов эта зависимость слабо выражена: при малых давлениях она практически не проявляется, но по мере их увеличения становится более заметной. На заболоченных (задернованных) грунтах эта зависимость более значительна.

Характер кривых значительно изменяется в зависимости от состояния грунта и от толщины слабого (переувлажнённого или разрыхлённого) слоя грунта. Принципиальной разницы между характеристиками деформации различных групп грунтов нет. Близкие по характеру кривые можно получить и на песке, и на суглинке. Это приводит к выводу о том, что все лесные грунты имеют общий характер деформации под нагрузкой, поэтому можно найти общий для всех грунтов аналитический метод оценки их деформируемости.

При этом известно несколько вариантов зависимостей, связывающих деформации основания с нагрузкой [2], [4].

Одной из наиболее известных является формула Винклера — Герстнера — Бернштейна [11]:

$$q = Ch^{\mu}, \quad (2)$$

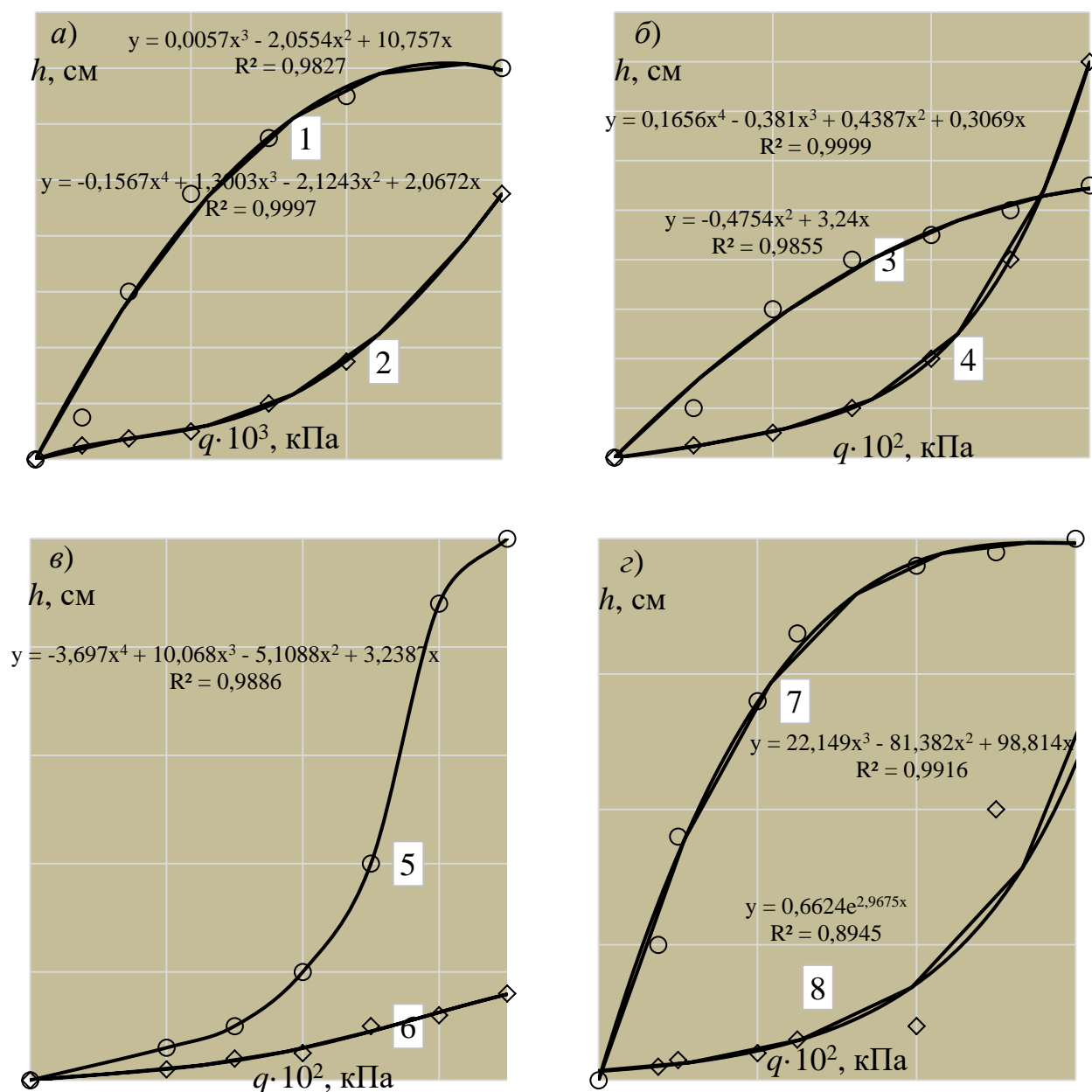
где  $q$  — нормальное давление в контакте движителя с поверхностью грунта,  $C$ ,  $\mu$  — эмпирические постоянные, определяемые типом и состоянием грунта, а также геометрическими параметрами штампа,  $h$  — нормальная деформация грунта (осадка штампа).

Зависимость (2) обладает существенным недостатком: при её использовании для получения адекватных результатов необходимо располагать экспериментальной зависимостью «давление — деформация» для каждой конкретной пары «основание — движитель», что сопряжено с проведением значительного объёма полевых испытаний.

В работе [3] предложена следующая формула:

$$q = C \cdot (h/b)^{\mu}, \quad (3)$$

где  $b$  — ширина штампа (т. е. ширина площадки контакта движителя с поверхностью грунта).

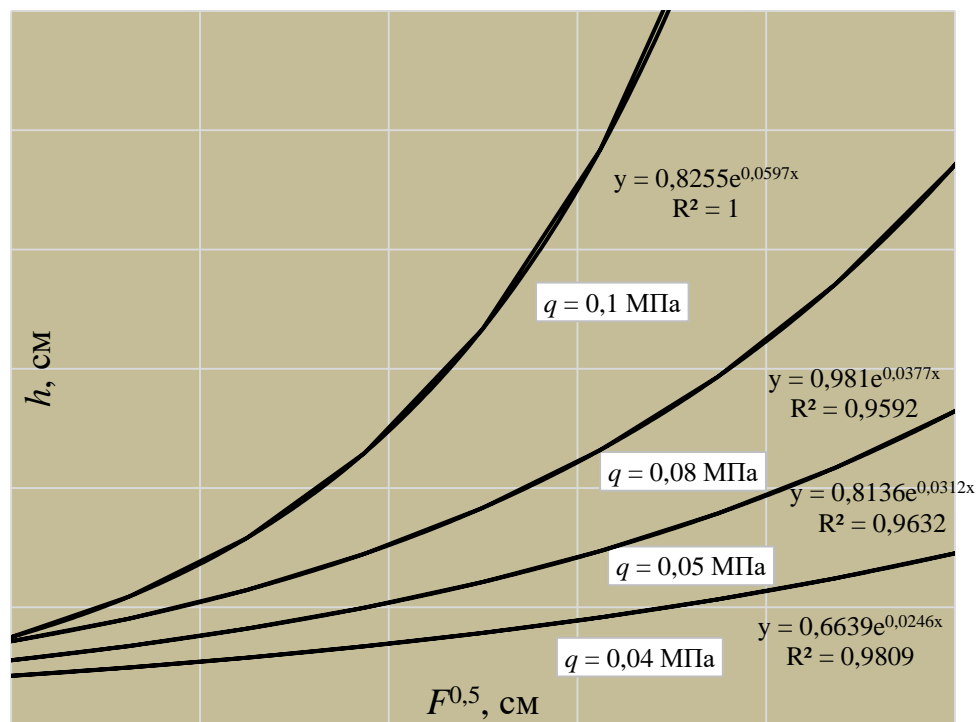


**Рисунок 2.** Результаты экспериментов по вдавливаю штампов в грунт:

а) — связный грунт, б) — песок, в) — торф, г) — снег; 1 — грунт переувлажнён на глубину 16—20 см, 2 — грунт в пластичном состоянии, 3 — грунт разрыхлён на глубину 15—20 см, 4 — грунт уплотнён, 5 — площадь штампа  $3,6 \text{ м}^2$ , 6 — площадь штампа  $0,4 \text{ м}^2$ , 7 — плотность  $0,15 \text{ г/см}^3$ , 8 — плотность  $0,20 \text{ г/см}^3$  [2]

**Figure 2.** The results of experiments on indentation of the stamp into the ground:

а) — cohesive soil, б) — sand, в) — peat, г) — snow; 1 — soil waterlogged to a depth of 16—20 cm, 2 — soil in a plastic state, 3 — soil loosened to a depth of 15—20 cm, 4 — soil compacted, 5 — stamp area  $3,6 \text{ м}^2$ , 6 — stamp area  $0,4 \text{ м}^2$ , 7 — density  $0,15 \text{ г/см}^3$ , 8 — density  $0,20 \text{ г/см}^3$  [2]



**Рисунок 3.** Влияние площади штампа на деформацию торфяных грунтов [2]

**Figure 3.** The influence of the area of the stamp on the deformation of peat soils [2]

Формула (3), на наш взгляд, более практична по сравнению с формулой (2). За счёт введения в формулу (3) ширины штампа  $b$  учитывается экспериментально установленный факт увеличения вертикальной деформации грунта  $h$  по мере увеличения площади штампа [рисунок 2, в), кривые 5 и 6]. Тем не менее для её применения также необходим значительный объём экспериментальных сведений.

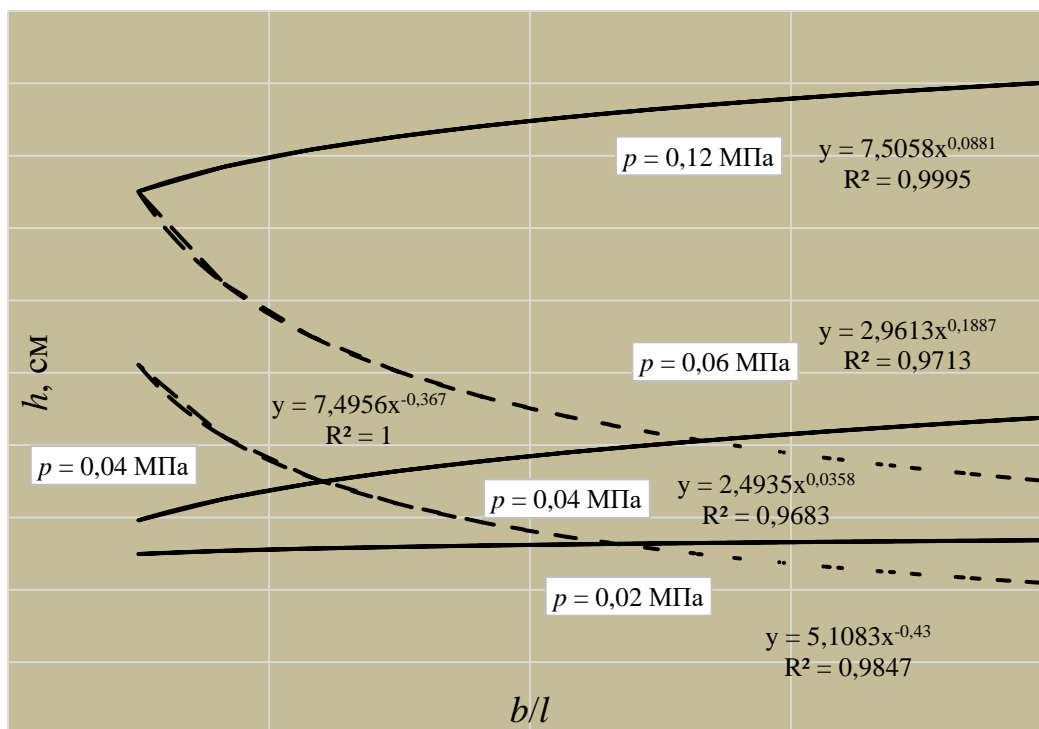
Ещё одна зависимость «давление — осадка» предложена в работе [1]:

$$q = \left( C_1 + \frac{C_2}{b} \right) \cdot h^\mu, \quad (4)$$

где  $C_1, C_2$  — постоянные грунта.

В формуле (4) влияние размеров штампа на деформацию грунта учитывается дифференцированно для различных типов грунта за счёт различного соотношения значений  $C_1, C_2$ .

Общим недостатком зависимостей (2)—(4) является их чисто эмпирический характер и отсутствие чёткого физического смысла параметров  $C, C_1, C_2, \mu$ , по этой причине в технике предложен ещё ряд моделей.



**Рисунок 4.** Глубина погружения штампа в грунт в зависимости от соотношения длины и ширины штампа [2]

**Figure 4.** Depth of immersion of the stamp in the ground, depending on the ratio of the length and width of the stamp [2]

В [18] представлено несколько моделей, каждая из которых пригодна для определённого диапазона почвенно-грунтовых условий. Например, для грунтов, на которых преобладают деформации сдвига, известна следующая зависимость:

$$q = S_B h + Q_B, \quad (5)$$

где

$$S_B = \gamma \cdot \tan^{-4}(0,25\pi - 0,5\varphi_0) \quad (6)$$

$$Q_B = 0,25b\gamma \cdot \sin \varphi_0 \sin^{-4}(0,25\pi - 0,5\varphi_0) \tan^{-1}(0,25\pi - 0,5\varphi_0) + C_0 \tan^{-1}(0,25\pi - 0,5\varphi_0) \sin^{-2}(0,25\pi - 0,5\varphi_0), \quad (7)$$

где  $\gamma$  — объёмный вес грунта,  $\varphi_0$  — угол внутреннего трения грунта,  $C_0$  — внутреннее сцепление грунта.

Использование независимых от размеров площадки контакта величин  $\gamma$ ,  $\varphi_0$ ,  $C_0$ , имеющих, кроме того, определённый физический смысл, даёт зависимости (5) преимущество по сравнению с рассмотренными ранее моделями. Однако в формуле (5) не учитывается влияние уплотнения грунта на его несущую способность и влияние близлежащего твёрдого слоя.

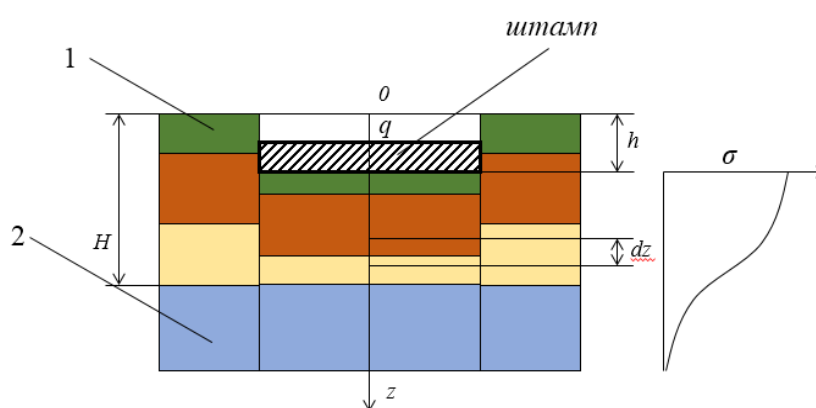
В этой связи в работе [19] предложена следующая модель:

$$h = \frac{b}{C} \ln \frac{(q + q_0) \cdot (S_B h + Q_B)}{q_0 \cdot (S_B h + Q_B - q)}, \quad (8)$$

В формуле (8) учитывается влияние ширины штампа  $b$  на несущую способность грунта, однако по-прежнему явно не учитывается толщина деформируемого слоя.

Для последующего исследования рассмотрим физическую картину деформации грунта штампом и модель, предложенную Я. С. Агейкиным [2].

Примем расчётную схему для определения величины осадки при взаимодействии движителя с почвогрунтом в соответствии с рисунком 5.



**Рисунок 5.** Схема к расчёту осадки штампа под действием нормальной нагрузки:  
 а — общая схема: 1 — слои почвогрунта, 2 — недеформируемое основание, б —  
 эпюра нормальных напряжений под штампом [2]

**Figure 5.** Scheme to the calculation of the stamp sludge under normal load:  
 а — General scheme: 1 — layers of soil-ground, 2 — non-deformable base, б —  
 plot of the normal stresses under the stamp [2]

Распределение напряжений  $\sigma$  (рисунок 5, б) с удовлетворительной точностью описывается формулой [1], [2]:

$$\sigma = \frac{J \cdot q \cdot k_D}{1 + (Az)^2}, \quad (9)$$

где  $J$  — параметр, учитывающий соотношение длины и ширины штампа (средняя длина и ширина площадки контакта движителя с почвогрунтом),  $A$  — коэффициент, учитывающий влияние близлежащего твёрдого слоя на распространение деформаций,  $k_D$  — коэффициент динамичности, учитывающий время действия нагрузки (зависит от скорости движения машины).

Коэффициенты  $J$ ,  $A$  принято определять по формулам [1], [2]:

$$J = \frac{0,03 + l/b}{0,6 + 0,43l/b}, \quad (10)$$

$$A = \frac{I}{0,64 \cdot b \cdot (1 + b/H)} \quad (11)$$

В выражении (10) длина штампа (средняя длина пятна контакта) определяется по формулам [1], [2]:

$$l_1 = 2\sqrt{Dh_z - h_z^2} \quad (12)$$

$$l_2 = \sqrt{D \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2} \quad (13)$$

$$l = l_1 + l_2 = 2\sqrt{Dh_z - h_z^2} + \sqrt{D \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2} \quad (14)$$

Сжатие элементарного слоя массива почвогрунта без учёта увеличения деформации сжатия за счёт сдвигов определяется по формуле [1], [2]:

$$dh^* = \frac{\sigma}{E - \sigma} dz, \quad (15)$$

Тогда без учёта сдвигов почвогрунта можем записать для сжатия всего массива почвогрунта [1], [2]:

$$h^* = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\sigma}{E - \sigma} dz, \quad (16)$$

С учётом увеличения деформации (осадки) за счёт сдвига почвогрунта действительную величину осадки принято определять по формуле [1], [2]:

$$h = k_p h^*, \quad (17)$$

где  $k_p$  — коэффициент, учитывающий сдвиг грунта по мере приближения напряжений в массиве к несущей способности [1], [2]:

$$k_p = \frac{p_s}{p_s - q \cdot k_d}, \quad (18)$$

где  $p_s$  — несущая способность массива почвогрунта.

После интегрирования выражения (16) с учётом формулы (18) можем записать:

$$h = - \frac{J \cdot q \cdot k_d \cdot k_p \cdot \operatorname{arctanh} \left( \frac{A \cdot E \cdot z}{\sqrt{(J \cdot q \cdot k_d) \cdot E}} \right) \Big|_{z=z_1}^{z=z_2}}{A \sqrt{(J \cdot q \cdot k_d) \cdot E}} \quad (19)$$

Пределы интегрирования  $z_2$  и  $z_1$  равны соответственно  $H - h$  и 0, тогда:

$$h = - \frac{J \cdot q \cdot k_d \cdot k_p \cdot \operatorname{arctanh} \left( \frac{A \cdot E \cdot (H - h)}{\sqrt{(J \cdot q \cdot k_d) \cdot E}} \right)}{A \sqrt{(J \cdot q \cdot k_d) \cdot E}} \quad (20)$$

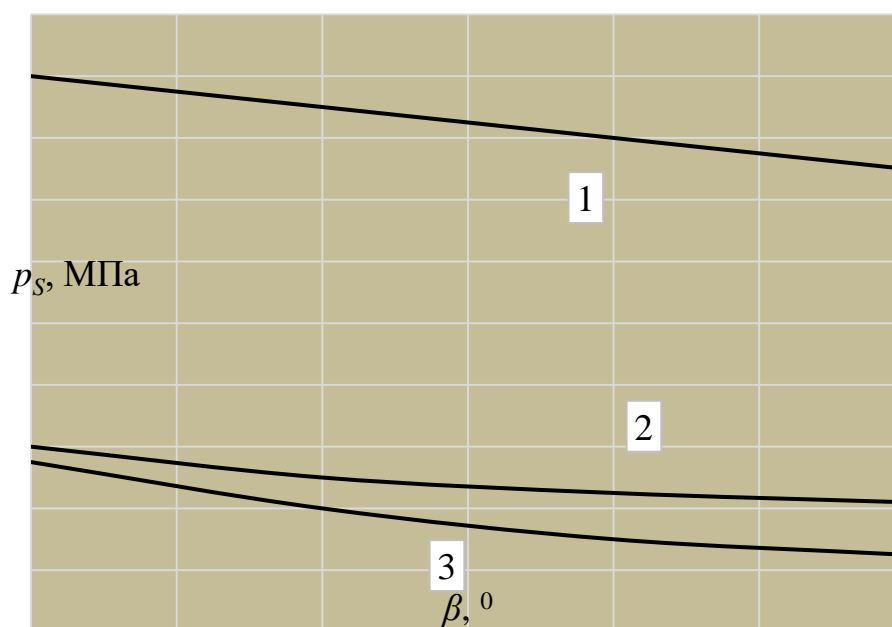
Использование модуля деформации в формуле (20) для оценки деформируемости почвогрунта целесообразно потому, что этот параметр имеет строго определённый физический смысл, его значение не зависит от размеров вдавливаемого тела; кроме того,



накоплен большой статистический материал его количественных значений для различных лесных грунтов.

Несущая способность почвогрунта, учитываемая в формулах (19), (20), не является независимой постоянной грунта, а изменяется в зависимости от размеров штампа и глубины его погружения [11]. Величину несущей способности почвогрунта можно определить экспериментальным (по кривой осадки штампа) либо расчётным путём.

В реальных условиях движения лесной машины на почвогрунт действует произвольно направленная нагрузка. Отклонение вектора нагрузки от нормали к поверхности грунта приводит к снижению несущей способности грунта, к увеличению толщины деформируемого слоя при ограниченной его толщине и к возникновению касательных сил в контакте штампа с почвогрунтом (пример представлен на рисунке 6). Всё это приводит к увеличению деформации массива почвогрунта.



**Рисунок 6.** Зависимость несущей способности грунта от направления приложенной нагрузки [11]:

1 — суглинистый грунт, 2 — глинистый грунт, 3 — песчаный грунт

**Figure 6.** Dependence of the bearing capacity of the soil on the direction of the applied load [11]:

1 — loamy soil, 2 — clay soil, 3 — sandy soil

Эти обстоятельства учитываются следующим образом. Несущая способность почвогрунта выражается уравнением [11]:

$$p_s = \frac{\pi}{2} p_{s0} \alpha \arctg \frac{\pi \cdot (H-h)}{2b}, \quad (21)$$

где  $p_{s0}$  — несущая способность массива почвогрунта неограниченной толщины,  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий ограниченную толщину деформируемого слоя массива почвогрунта.

Коэффициент  $\alpha$  можно оценить, например, по формуле [11]:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \operatorname{arctg} \frac{\pi \cdot (H - h)}{2b} \quad (22)$$

Выражение для несущей способности массива почвогрунта неограниченной толщины имеет вид [11]:

$$p_{s0} = K_{\beta 1} I_1 X_1 b + K_{\beta 2} I_2 X_2 + X_3 h, \quad (23)$$

где  $X_1, X_2, X_3$  — коэффициенты учёта влияния физико-механических свойств почвогрунта на несущую способность массива,  $I_1, I_2$  — коэффициенты учёта геометрических параметров пятна контакта на несущую способность массива почвогрунта,  $K_{\beta 1}, K_{\beta 2}$  — коэффициенты учёта угла приложения нагрузки на несущую способность массива почвогрунта.

Коэффициенты  $K_{\beta 1}, K_{\beta 2}$  определяются по формулам [11]:

$$K_{\beta 1} = \frac{\pi - 4\beta \operatorname{tg} \varphi_0}{\pi + 4\beta \operatorname{tg} \varphi_0}, \quad (24)$$

$$K_{\beta 2} = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta}, \quad (25)$$

где  $\beta$  — угол приложения нагрузки.

Угол  $\beta$  определяется по выражению [11]:

$$\beta = \arccos \frac{q}{\sqrt{q^2 + \tau^2}}, \quad (26)$$

где  $\tau$  — касательное напряжение.

Эксперименты показывают, что почвогрунты обладают релаксационными свойствами [11], [20]. Многие распространённые релаксационные модели почвогрунта обычно основаны на теории Максвелла. К. Максвелл, исходя из предположения, что выравнивание или релаксация напряжений в пластичных телах во времени совершается пропорционально величине действующих напряжений, получил зависимость [21]:

$$\sigma_t = \sigma_0 \exp(-t/t_p) \quad (27)$$

где  $\sigma_t$  — напряжение в определённый момент времени,  $\sigma_0$  — начальное напряжение,  $t$  — время действия нагрузки,  $t_p$  — время релаксации.

Предпосылки, принятые Максвеллом, справедливы и для дисперсной системы, тогда уравнение (27) можно использовать для выражения напряжений в массиве почвогрунта по времени. Кратковременность действия нагрузки на почвогрунт можно учесть динамическим коэффициентом снижения напряжений  $k_d$ , зависящим от релаксационных свойств грунта [21].

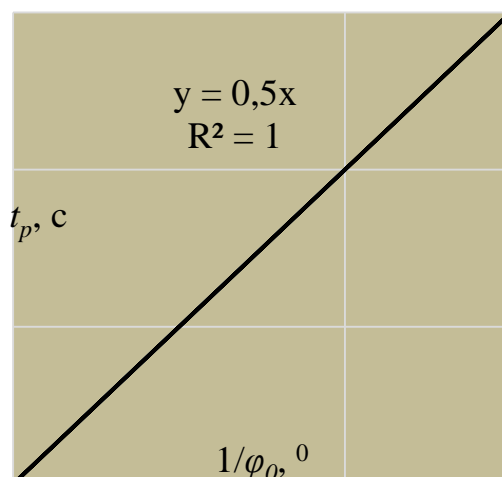
Значение динамического коэффициента определяют из уравнения (27):

$$k_d = \frac{\sigma_0 \int_0^t [\exp(1-t/t_p)] dt}{\sigma_0 \int_0^\infty [\exp(1-t/t_p)] dt} = 1 - \exp(-t/t_p) \quad (28)$$

Выражение (27) часто заменяют близким ему, но более удобным для практических расчётов:

$$k_d = t/(t + t_p) \quad (29)$$

Время релаксации напряжений находится в зависимости от угла внутреннего трения почвогрунта (график на рисунке 7).



**Рисунок 7.** Зависимость времени релаксации напряжений почвогрунта от угла внутреннего трения [2]

**Figure 7.** The dependence of the relaxation time of the stress of the soil on the angle of internal friction [2]

Зависимость, показанную на графике, можно представить в виде формулы:

$$t_p = 0,5/\varphi_0 \quad (30)$$

#### 4. Обсуждение и заключение

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. В лесной промышленности для трелёвки широкое распространение получили машины с колёсным двигателем. Достоинствами таких машин являются маневренность, сравнительно высокая скорость движения, что благоприятно сказывается на производительности.

2. Исследование вопросов проходимости лесных машин необходимо для решения целого ряда актуальных практических задач: повышение эффективности использования парка машин в тяжёлых почвенно-грунтовых условиях (например, в период распутицы, зимой),

оптимизация конструкции и обоснование параметров лесных машин исходя из условия обеспечения максимальной приспособляемости к конкретным условиям их использования, оптимизация и обоснование показателей трелёвки (например, число проходов машины по волоку, обоснование рейсовой нагрузки трелёвочной машины и т. д.) исходя из условия обеспечения максимальной приспособляемости техники к конкретным условиям её использования; проектирование и создание машин повышенной проходимости для использования в заболоченных местностях и районах с глубоким снежным покровом.

6. На настоящем этапе при расчётах используются значения коэффициента сопротивления движению безотносительно веса машины. При этом известны работы, в которых доказан нелинейный характер изменения силы сопротивления перемещению колёсной машины в зависимости от её веса; это свидетельствует о том, что коэффициент сопротивления движению не является постоянной величиной для определённого типа местности.

7. Анализ влияния сопротивления почвогрунта деформированию с учётом установленных связей для характеристик современных колёсных форвардеров показал, что сопротивление почвогрунта движению не ограничивает объём трелюемых лесоматериалов. При изменении коэффициента сопротивления движению в пределах от 0,1 до 0,5 сила сопротивления движению форвардера не превышает по значению максимальное тяговое усилие машины. Таким образом, можно заключить, что для современных колёсных форвардеров ограничение объёма трелюемых лесоматериалов по максимальной силе тяги не актуально.

8. Анализ влияния коэффициента сопротивления движению на скорость движения лесных машин показал, что при одинаковой нагрузке транспортная скорость машины может меняться в 4—5 раз, в зависимости от условий работы. Это влияние более выражено у машин с небольшой грузоподъёмностью, применяемых на сравнительно слабых грунтах.

9. При допущении об обратно-пропорциональной связи коэффициента сцепления и коэффициента сопротивления движению, с учётом установленных связей для характеристик лесных машин, ограничение веса машины по сцеплению отмечается на сравнительно слабых грунтах.

10. Неровности поверхности движения вызывают как снижение скорости движения лесных машин, так и застревание (полную потерю проходимости). Поскольку глубина колеи, образующейся при проходе машины, находится в тесной зависимости с механическими свойствами поверхности движения и суммарным весом машины, а корни деревьев могут залегать на сравнительно небольшой глубине, при движении лесной машины крупные корни деревьев могут становиться препятствиями, в результате встречи с которыми возможна потеря проходимости машины. Это обстоятельство может быть использовано в качестве ещё одного ограничения на нагрузку машины.

## Список литературы

1. *Вольская, Н. С.* Теория автомобиля. Оценка эксплуатационных свойств автомобиля на компьютере : учебно-методическое пособие / Н. С. Вольская, Я. С. Агейкин. — Москва : МГИУ, 2005. — 32 с.
2. *Агейкин, Я. С.* Проходимость автомобилей / Я. С. Агейкин. — Москва : Машиностроение, 1981. — 232 с.
3. *Ларин, В. В.* Оценка тягово-экономических характеристик транспортных средств при движении по деформируемым опорным поверхностям и местности / В. В. Ларин // Известия вузов. Машиностроение. — 1998. — № 10—12. — С. 75—84.
4. *Григорьев, И. В.* Снижение отрицательного воздействия на почву колёсных трелёвочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования / И. В. Григорьев. — Санкт-Петербург : ЛТА, 2006. — 236 с.
5. Средащадящие технологии разработки лесосек в условиях северо-западного региона Российской Федерации / И. В. Григорьев, А. И. Жукова, О. И. Григорьева, А. В. Иванов. — Санкт-Петербург : ЛТА, 2008. — 176 с.
6. *Ревут, И. Б.* Физика почвы / И. Б. Ревут. — Ленинград : Колос, 1972. — 365 с.
7. *Цытович, Н. А.* Механика грунтов. Краткий курс / Н. А. Цытович. — Москва : Высш. шк., 1983. — 288 с.
8. *Хитров, Е. Г.* Повышение эффективности трелёвки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, А. М. Хахина. — Санкт-Петербург, 2015.
9. New approach for forest production stocktaking based on energy cost / I. Grigorev, E. Khitrov, A. Kalistratov, V. Bozhbov, V. Ivanov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. — 2014. — P. 407—414.
10. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation / I. Grigorev, A. Nikiforova, E. Khitrov, V. Ivanov, G. Gasparian // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. — 2014. — P. 443—446.
11. *Агейкин, Я. С.* Вездеходные колёсные и комбинированные движители. Теория и расчёт / Я. С. Агейкин. — Москва : Машиностроение, 1972. — 184 с.
12. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учётом деформации почвогрунта / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, В. А. Макуев, А. М. Хахина, С. Ю. Калинин // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. — 2015. — Т. 19, № 6. — С. 87—90.
13. Расчёт конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта / Е. Г. Хитров, Г. В. Григорьев, И. Н. Дмитриева, Д. А. Ильюшенко // Системы. Методы. Технологии. — 2014. — № 4 (24). — С. 127—131.
14. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров / В. Я. Шапиро, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев, М. Ф. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2018. — № 1 (361). — С. 61—69.
15. Математическое моделирование процесса уплотнения мёрзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелёвочных систем / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева // Системы. Методы. Технологии. — 2018. — № 3 (39). — С. 73—78.
16. *Григорьев, И. В.* Характеристики микропрофилей трелёвочных волоков, определяющие динамическое уплотнение почвы / И. В. Григорьев // Актуальные проблемы лесного комплекса. — 2005. — № 11. — С. 5—8.

17. Григорьев, И. В. Методика определения характеристик микропрофиля трелёвочного волокна / И. В. Григорьев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. — 2005. — № 176. — С. 76—85.
18. Бабков, В. Ф. Автомобильные дороги / В. Ф. Бабков. — Москва : Транспорт, 1983. — 280 с.
19. Покровский, Г. И. Исследование сжатия почвы при различных скоростях деформации / Г. И. Покровский, С. П. Наседкин, С. И. Синельников // Почвоведение. — 1938. — № 1. — С. 59—69.
20. Experimental findings in forest soil mechanics / M. F. Grigorev, A. I. Grigoreva, I. V. Grigorev, O. A. Kunitskaya, D. I. Stepanova, M. S. Savvinova, M. N. Sidorov, E. P. Tomashevskaya, I. A. Burtseva, O. I. Zakharova // EurAsian Journal of BioSciences. — 2018. — Т. 12, № 2. — С. 277—287.
21. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. — Москва : Высш. шк., 1979. — 448 с.

## References

1. Volskaya, N. S. Car theory. Assessment of the operational properties of the vehicle on the computer: a Teaching aid / N. S. Volskaya, J. S. Ageikin. — Moscow : MGIU, 2005. — 32 p.
2. Again, J. S. Permeability of automobiles / J. S. Ageikin. — Moscow : Mashinostroenie, 1981. — 232 p.
3. Larin, V. V. Evaluation of traction and economic characteristics of vehicles when driving on deformable bearing surfaces and terrain / V. Larin // Izvestiya vuzov. Engineering. — 1998. — No 10—12. — P. 75—84.
4. Grigorev, I. V. Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidders by substantiating the modes of their movement and technological equipment / I. V. Grigorev. — Saint-Petersburg : LTA, 2006. — 236 p.
5. Sidodadi technology development of cutting areas in the North-West region of the Russian Federation / I. V. Grigorev, A. I. Zhukova, O. I. Grigoreva, A. V. Ivanov. — Saint-Petersburg : LTA, 2008. — 176 p.
6. Revut, I. B. Soil Physics / I. B. Revut. — Leningrad : Kolos, 1972. — 365 p.
7. Tsytoovich, N. A. Soil Mechanics. Short course / N. A. Tsytoovich. — Moscow : Higher school, 1983. — 288 p.
8. Khitrov, E. G. Improving the efficiency of skidding with a study of the performance of forest machines under the operational control of the properties of soils / E. G. Khitrov, I. V. Grigorev, A. M. Chahina. — Saint-Petersburg, 2015.
9. New approach for forest production stocktaking based on energy cost / I. Grigorev, E. Khitrov, A. Kalistratov, V. Bozhbov, V. Ivanov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. — 2014. — P. 407—414.
10. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation / I. Grigorev, A. Nikiforova, E. Khitrov, V. Ivanov, G. Gasparian // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. — 2014. — P. 443—446.
11. Again, J. C. Off-road wheeled and combined propulsion. The theory and analysis / J. C. Again. — Moscow : Mashinostroenie, 1972. — 184 p.
12. A Model for estimating radial deformation of the wheels of the forest machine, taking into account the deformation of the soil-ground / E. G. Khitrov, I. V. Grigorev, V. A. Makuev, A. M. Chahina, S. Kalinin // Bulletin of Moscow state forest University — Forest Herald. — 2015. — Vol. 19, No 6. — P. 87—90.

13. Calculating the cone index value of the deformation modulus forest soils / E. G. Khitrov, I. V. Grigorev, I. N. Dmitriev, D. A. Ilyushenko // System. Methods. Technologies. — 2014. — № 4 (24). — P. 127—131.
14. Theoretical study of the process of destruction of soil with spherical knives using combined structures of soil meters to extinguish forest fires / V. Ya. Shapiro, O. I. Grigoreva, I. V. Grigorev, M. F. Grigorev // Proceedings of higher educational institutions. Forest journal. — 2018. — № 1 (361). — P. 61—69.
15. Mathematical modeling of compacting process of the frozen soil under the influence of forest machines and logging systems / S. E. Rudow, B. Ya. Shapiro, I. V. Grigoiev, O. A. Kunitskaya, O. I. Grigoreva // System. Methods. Technologies. — 2018. — № 3 (39). — P. 73—78.
16. *Grigorev, I. V.* Characteristics of skidding fibers microprofiles determining dynamic soil compaction / I. V. Grigorev // Actual problems of forest complex. — 2005. — No 11. — P. 5—8.
17. *Grigorev, I. V.* Method of determining the characteristics of the microprofile skidding portage / I. V. Grigorev // Proceedings of the St. Petersburg forestry Academy. — 2005. — No 176. — P. 76—85.
18. *Babkov, V. F.* Highways / V. F. Babkov. — Moscow : Transport, 1983. — 280 p.
19. *Pokrovsky, G. I.* Study of soil compression at different strain rates / G. I. Pokrovsky, S. P. Nasedkin, S. I. Sinelnikov // Soil science. — 1938. — № 1. — P. 59—69.
20. Experimental findings in forest soil mechanics / M. F. Grigorev, A. I. Grigoreva, I. V. Grigorev, O. A. Kunitskaya, D. I. Stepanova, M. S. Savvinova, M. N. Sidorov, E. P. Tomashevskaya, I. A. Burtseva, O. I. Zakharova // EurAsian Journal of BioSciences. — 2018. — T. 12, № 2. — C. 277—287.
21. *Vyalov, S. S.* Rheological fundamentals of soil mechanics / S. S. Vyalov. — Moscow : Vyssh. shk., 1979. — 448 p.