

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <https://naukovedenie.ru/>

Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/vol9-5.php>

URL статьи: <https://naukovedenie.ru/PDF/14TVN517.pdf>

Статья опубликована 22.09.2017

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Крашенинников М.С., Барахтанов Л.В. Расчет погружения роторно-винтового движителя в снег // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/14TVN517.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

*Работа выполнена в НГТУ им. Р.Е. Алексеева, при финансовой поддержке государства в лице министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения 14.577.21.0222 от 03.10.2016. Идентификационный номер проекта: RFMEFI57716X0222. Тема: «Создание экспериментального образца амфибийного автономного транспортно-технологического комплекса с интеллектуальной системой управления и навигации для круглогодичного проведения разведочно-буровых работ на арктическом шельфе»*

**УДК 629.3.035**

### **Крашенинников Максим Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Россия, Нижний Новгород<sup>1</sup>

Научный сотрудник

E-mail: [maxim.krashennnikov@mail.ru](mailto:maxim.krashennnikov@mail.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=625093](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=625093)

### **Барахтанов Лев Васильевич<sup>2</sup>**

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Россия, Нижний Новгород

Профессор кафедры «Автомобили и тракторы»

Доктор технических наук

E-mail: [barahtanov@yandex.ru](mailto:barahtanov@yandex.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=642797](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=642797)

## **Расчет погружения роторно-винтового движителя в снег**

**Аннотация.** Данная работа является логическим продолжением исследований, направленных на повышение точности моделирования процессов взаимодействия роторно-винтового движителя со снегом. В настоящей работе описаны результаты математического моделирования осадки движителя с использованием разработанной ранее детализированной математической модели поверхности роторно-винтового движителя. Дана оценка влияния величины осадки на силы сопротивления движению роторно-винтовой машины.

Для роторно-винтовых машин осадка движителя в опорное основание имеет большое значение, т. к. с ее ростом происходит два принципиальных процесса:

1. Увеличиваются силы сопротивления движению (трение, колееобразование). В этом отношении роторно-винтовой движитель сопоставим с колесными и гусеничными типами движителей.

---

<sup>1</sup> 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

<sup>2</sup> Индивидуальный номер ученого карты Российской науки:  
<https://mapofscience.ru/scientist/1015983barahtanov@yandex.ru>

2. Увеличивается площадь контакта активной грани лопасти, реализующей силу тяги. Данное обстоятельство отличает роторно-винтовой движитель от колесного или гусеничного типа движителей.

Для моделирования осадки в снег использованы апробированные модели физико-механических характеристик снега, а также предложена уточненная схема взаимодействия снега с элементарной площадкой поверхности движителя.

В результате исследований было установлено, что точность геометрического описания поверхности роторно-винтового движителя влияет на результат расчета осадки в снег. Традиционное представление поверхности движителя в виде классического цилиндра дает наименее точные результаты в расчете осадки – расхождение с результатом, полученным для точной поверхности достигает порядка 10 %.

Учет сил трения показал, что для погруженного в снег и неподвижного ротора их уровень достигает порядка 15 % от общей реакции снега.

Представленный в настоящей работе способ расчета осадки позволяет учесть влияние сил трения и применим для детализированного описания поверхности роторно-винтового движителя.

**Ключевые слова:** роторно-винтовой движитель; опорное основание; осадка; математическое моделирование; поверхность; напряжения; сила трения

## Введение

Погружение роторно-винтового движителя (РВД) в снег в значительной степени определяет сопротивление движению и проходимость машины в целом.

Определение уровня погружения подробно изложены в работах по теории и методам расчета РВД [1-8]. Вместе с тем, в этих работах практически не освещены вопросы влияния винтовой лопасти на базовом цилиндре и сил трения на поверхности контакта на процесс погружения движителя.

Данная работа является логическим продолжением исследований ученых Нижегородской научной школы, в которой сделана попытка учета данных параметров. В разработанной математической модели поверхность роторно-винтового движителя описывается с помощью элементарных треугольных площадок. Для каждой площадки проводится расчет действующих на нее сил для последующего суммирования. При этом полагается, что силы реакции снега были вызваны его деформацией, и определяются с помощью соответствующих физико-механических характеристик.

## Физико-механические характеристики снега

Для расчета погружения роторно-винтового движителя необходимо знать зависимости: деформации снега от нормальной нагрузки и сил трения в паре «материал движителя – снег». Исследованию этих важнейших зависимостей посвящено большое количество трудов как отечественных, так и зарубежных исследователей [10...12].

Для выбора зависимостей, которые будут использованы в математической модели снега, было принято решение опираться на многолетний опыт ученых Нижегородской научной школы вездеходных машин. В работах представителей данной школы названные зависимости подробно исследованы и изложены. Так, зависимость деформации снега от нормальной нагрузки определялась по формуле В. А. Малыгина [13]:

$$h = \frac{q}{\left(\frac{1}{h_{max}}\right)q + \gamma}, \quad (1)$$

где:  $h$  – величина деформации снега, м;  $q$  – нормальная нагрузка, Н/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – коэффициент начальной жесткости снега, характеризующий удельное сопротивление снега сжатию, представляет собой коэффициент жесткости (Н/м<sup>3</sup>) в начальной стадии деформации;  $h_{max}$  – коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению.

$$h_{max} = H \frac{n_y b + d}{b + d},$$

где:  $H$  – высота снежного покрова, м;  $b$  – ширина штампа, м;  $n_y$  – коэффициент уплотняемости снега;  $d$  – эмпирический коэффициент.

$$n_y = \frac{a}{\rho + a},$$

где:  $\rho$  – начальная плотность снега, г/см<sup>3</sup>;  $a$  – константа, равная 0,3 г/см<sup>3</sup>.

Зависимость сил трения в паре «материал движителя – снег» описывается законом Кулона-Мора (2):

$$\tau_\alpha = c_\alpha + q \operatorname{tg} \varphi_\alpha, \quad (2)$$

где:  $\tau_\alpha$  – касательные напряжения, Па;  $c_\alpha$  – связность трущихся поверхностей, Па;  $\operatorname{tg} \varphi_\alpha$  – коэффициент трения.

Важной особенностью снега является нелинейное изменение его ключевых параметров в процессе деформации. В ОНИЛВМ по результатам многочисленных экспериментов для снега влажностью менее 12 % и температурой от минус 5 до минус 20 °С установлены корреляционные зависимости между механическими параметрами (коэффициентом жесткости, связностью, коэффициентом внутреннего трения) и физическим параметром – плотностью снега [14].

Значение плотности снега, увеличивающееся от сжатия, определяется по выражению (3):

$$\rho = 0,7943 - 4,1925(\rho_0 / \varepsilon_\Gamma) + 10,525(\rho_0 / \varepsilon_\Gamma)^2 - 6,9069(\rho_0 / \varepsilon_\Gamma)^3, \quad (3)$$

где:  $\rho$  – плотность после приложения нагрузки, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_0$  – плотность снега до приложения нагрузки, г/см<sup>3</sup>;  $\varepsilon_\Gamma$  – относительная деформация, определяемая по выражению  $\varepsilon_\Gamma = (H_\Gamma - z_\Gamma) / H_\Gamma$ , где  $H_\Gamma$  – глубина снежного покрова, м;  $z_\Gamma$  – расстояние от поверхности подстилающего слоя до нижней точки внедряемого в снег штампа, м.

Увеличившаяся от сжатия плотность снега, определяемая в соответствии с (3), нелинейно влияет на коэффициент жесткости, связность и угол внутреннего трения в соответствии с выражениями (4):

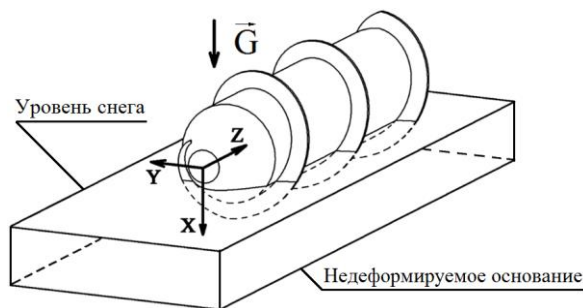
$$\begin{aligned} K_{ж} &= \exp(2,944 + 69,762\rho - 119,97\rho^2 + 84,02\rho^3); \\ c_0 &= \exp(3,894 + 14,399\rho + 0,279\rho^2 - 12,956\rho^3); \\ \varphi_0 &= 0,2089 - 0,0886\rho + 2,2148\rho^2 - 1,7263\rho^3; \end{aligned} \quad (4)$$

где  $K_{ж}$  – коэффициент жесткости, Н/м<sup>3</sup>;  $c_0$  – связность снега, МПа;  $\Phi_0$  – угол внутреннего трения, рад.

Выбор в пользу представленных зависимостей объясняется многочисленными исследованиями и проведенными испытаниями ученых Нижегородской научной школы вездеходных машин. Использование представленных зависимостей в комплексе позволяет определить изменения ключевых свойств снега в зависимости от нагрузки, и учесть данные явления в математической модели.

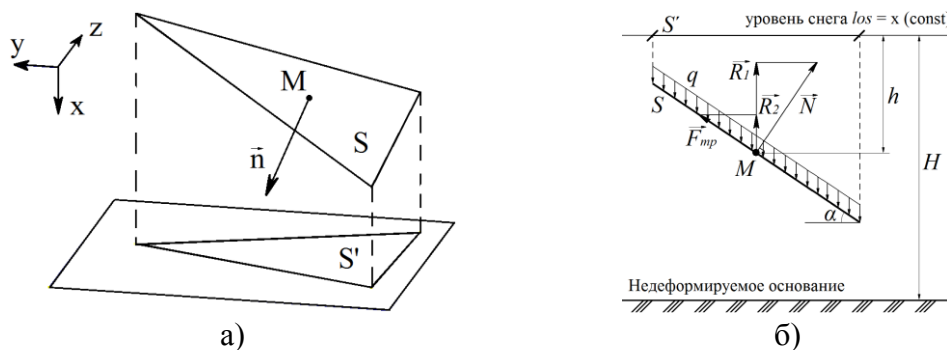
### Схема взаимодействия одиночного РВД со снегом

Для моделирования погружения роторно-винтового движителя в снег используется математическая модель движителя, приведенная в [9]. Принято, что все элементарные площадки поверхности движителя действуют на снег подобно штампам, подвергаящим снег только вертикальной нагрузке. Поверхность снежного покрова в модели представлена секущей плоскостью, которая отделяет часть объема роторно-винтового движителя. Данная плоскость добавлена в модель движителя для упрощения математических выражений и является параллельной базовой плоскости  $YZ$  (рисунок 1). Направление действия силы тяжести совпадает с осью  $X$ .



**Рисунок 1.** Способ представления снега в модели роторно-винтового движителя (составлено авторами)

Расчетная схема взаимодействия произвольной элементарной площадки со снегом, в соответствии с принятой моделью, представлена на рисунке 2. Для упрощения иллюстрации сил взаимодействия (рисунок 2, б) треугольная площадка показана под таким углом, когда она выглядит как отрезок.



**Рисунок 2.** Расчетная схема для процесса погружения (составлено авторами)

Последовательность расчета выглядит следующим образом:

1. Определение контакта элементарной площадки со снегом. Для каждой площадки, контактирующей со снегом должно выполняться два условия:

- положение площадки (центр тяжести треугольника  $M$ ) находится не выше поверхности снега;
- ориентация площадки такова, что вектор единичной нормали площадки направлен в сторону снега, а не от него.

Данные условия в соответствии с рисунком 2 представлены следующим образом (5):

$$M_x > los; \quad n_x \geq 0; \quad (5)$$

где:  $M_x$  – координата  $X$  центра тяжести треугольной площадки, м;  $n_x$  – координата  $X$  единичного вектора нормали;  $los$  (от англ. «level of snow») – уровень снега, определяемый постоянным значением координаты  $X$ , м.

2. Определение уровня погружения элементарной площадки в снег (6):

$$h = M_x - los, \quad (6)$$

где:  $h$  – уровень погружения элементарной площадки в снег, м.

3. Определение площади проекции пространственной элементарной площадки на горизонтальную плоскость (7):

$$S' = S \cdot \cos \alpha = S \cdot n_x, \quad (7)$$

где:  $S'$  – площадь вертикальной проекции площадки, м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь треугольной площадки, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол наклона треугольной площадки к горизонтальной плоскости, град.

4. Определение вертикального давления в зоне контакта снега с элементарной площадкой. Это давление, для погруженной на глубину  $h$  площадки, определяется с помощью зависимости (1).

5. Определение вертикальной силы реакции снега от сжатия (8):

$$R_1 = q \cdot S', \quad (8)$$

где:  $R_1$  – вертикальная сила реакции снега от сжатия, Н.

6. Определение нормально ориентированной силы, производной от вертикальной реакции, действующей на элементарную площадку (9):

$$N = \frac{R_1}{\cos \alpha} = \frac{R_1}{n_x}, \quad (9)$$

где:  $N$  – нормально ориентированная сила, производная от вертикальной силы реакции снега, действующая на элементарную площадку, Н.

7. Определение силы трения, также препятствующей погружению площадки в снег (10) [14]:

$$F_{\text{тр}} = k \cdot N + C_o \cdot S = (k \cdot q + C_o) \cdot S, \quad (10)$$

где:  $F_{\text{тр}}$  – сила трения, Н;  $C_o$  – связность снега, Па;  $k$  – коэффициент трения материала движителя по снегу.

8. Определение вертикальной составляющей силы трения (11):

$$R_2 = F_{\text{тр}} \cdot \sin \alpha, \quad (11)$$

где:  $R_2$  – вертикальная составляющая силы трения, Н.

9. Определение суммарной вертикальной реакции снега, вызванной погружением элементарной площадки (12):

$$R = R_1 + R_2 = R_1 + (k \cdot q + C_0) \cdot S \cdot \sin \alpha, \quad (12)$$

где:  $R$  – суммарная вертикальная реакция снега, Н.

### Сравнение способов расчета осадки роторно-винтового движителя в снег

Известен, нашедший широкое распространение [1...3], способ расчета осадки роторно-винтового движителя в снег, который производится с допущением о восприятии нормальной реакции грунта только базовым цилиндром движителя без учета винтовой лопасти и геометрии наконечников.

Для оценки влияния винтовых лопастей и геометрии наконечников произведено сравнение трех способов расчета осадки роторно-винтового движителя в снег:

1. движитель представлен классическим цилиндром без учета наконечников и лопастей [1...3];
2. движитель представлен классическим цилиндром с учетом наконечников, но без лопастей (отличается от первого способа учетом сил трения и формы наконечников);
3. поверхность роторно-винтового движителя описывается разработанной математической моделью [9] (учитывает лопасти, наконечники и силу трения).

Длина классического цилиндра для расчета по первому способу была равна длине базового цилиндра движителя. Физико-механические характеристики снега для расчета приняты в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1

### Численные значения свойств снега, принятые в расчете (составлено авторами)

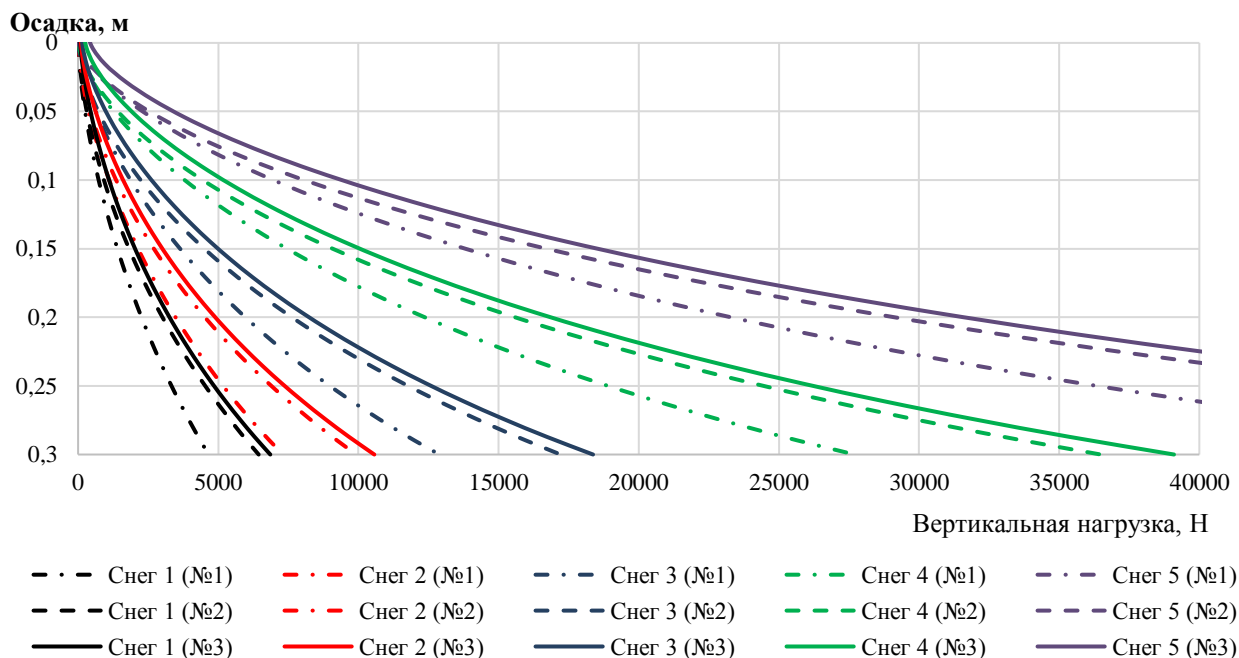
Название типа снега	Плотность снега до деформации, г/см <sup>3</sup>	Глубина снега, м	Жесткость снега, кПа/м	Связность снега, кПа	Коэффициент внутреннего трения	Тип снега	Вид снега	Разновидность	Состояние
Снег-1	0,15	0,7	20	0,5	0,25	фрикционно-связной	уплотненный	осевший	сухой
Снег-2	0,2	0,65	30	1	0,3		перекристаллизованный	мелкозернистый	сухой рыхлый
Снег-3	0,25	0,6	50	2,5	0,33		перекристаллизованный (зернистый)	крупнозернистый	смерзшийся
Снег-4	0,3	0,55	100	5	0,36				
Снег-5	0,35	0,5	180	9	0,39	фрикционный	фирновый	сухопластинчатый	сухой сыпучий

В расчетах были приняты следующие размеры роторно-винтового движителя:

- Длина носового наконечника 0,535 м;
- Длина базового цилиндра 1,5 м;
- Длина хвостового наконечника 0,165 м;

- Диаметр носка носового наконечника 0,146 м;
- Диаметр базового цилиндра 0,6 м;
- Диаметр носка хвостового наконечника 0,35 м;
- Число заходов винтовой лопасти на базовом цилиндре 2 шт.;
- Число заходов винтовой лопасти на носовом наконечнике 4 шт.;
- Шаг навивки отдельной винтовой лопасти 1 м;
- Торцевая высота винтовой лопасти 75 мм.

Графическое представление зависимостей «нагрузка-осадка» для трех способов расчета приведено на рисунке 3. Способ расчета для каждого типа снега указан в скобках.



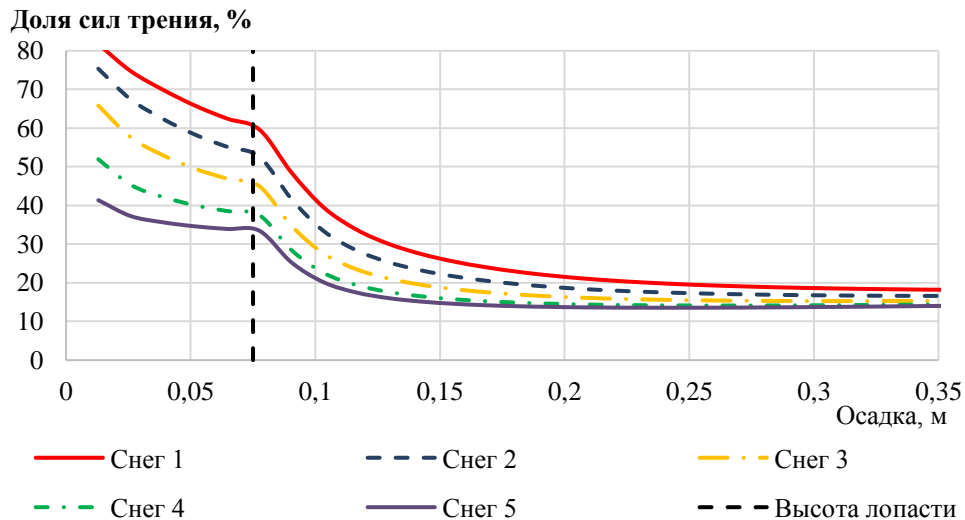
**Рисунок 3.** Зависимости «нагрузка-осадка», определенные с помощью трех способов расчета (составлено авторами)

Считая априорно результат расчета по разработанной методике самым точным можно заключить следующее: грубое представление поверхности движителя в виде классического цилиндра дает наименее точные результаты, учет сил трения позволяет лишь незначительно снизить расхождение – следовательно больший вклад в расхождение вносит форма движителя. Разница в расчете величины осадки между методом с использованием математической модели движителя [9] и методом А. П. Куляшова [1] достигает 10 %.

На начальных стадиях проектирования движителя для определения габаритных и основных геометрических размеров можно рекомендовать использование упрощенного описания формы движителя – классический цилиндр, содержащий наконечники, но не винтовые лопасти. Подобный прием позволит значительно ускорить процесс расчета при малых отклонениях от результатов, полученных по точно смоделированной поверхности движителя с использованием предложенной методики.

### Структура сил реакции снега при осадке роторно-винтового движителя

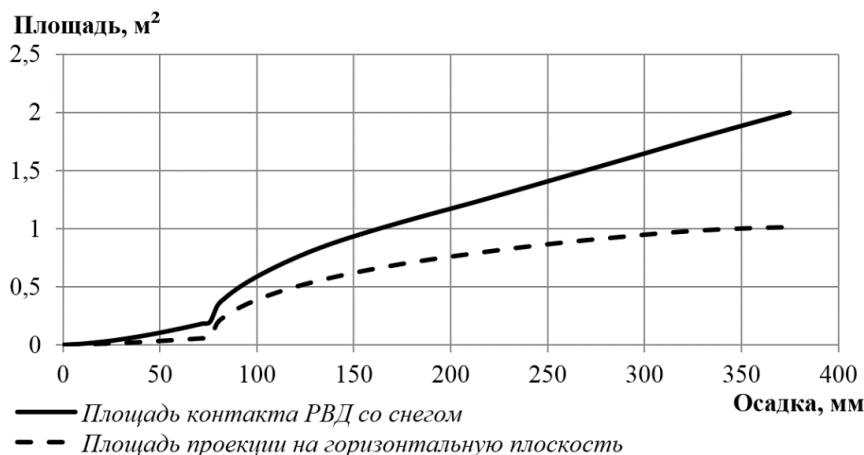
В соответствии с разработанными расчетными схемами (рисунок 2), становится возможным определить структуру реакции снега и определить соотношение между вертикальной реакцией и вертикальной составляющей силы трения (рисунок 4).



**Рисунок 4.** Доля сил трения в суммарной реакции снега при осадке РВД (составлено авторами)

Влияние сил трения изменяется по мере погружения роторно-винтового движителя в снег. До момента погружения базового цилиндра силы трения развивают порядка 50% вертикальной силы реакции снега, препятствующей дальнейшему погружению ротора. После момента контакта базового цилиндра со снегом влияние сил трения резко снижается и достигает уровня около 15%. Учет сил трения позволяет точнее оценить способности роторно-винтовых машин двигаться по различным слабонесущим опорным основаниям по сравнению с ранее известными методиками.

Рост влияния вертикальной составляющей в нормальных реакциях на элементарную площадку поверхности движителя со стороны снега обусловлен его геометрией, а именно характером нарастания площади контакта со снегом в процессе погружения. Для роторно-винтового движителя эта зависимость носит одинаковый характер и представлена на рисунке 5 на примере движителя с ранее указанными геометрическими размерами.



**Рисунок 5.** Зависимость площади контакта РВД со снегом и ее проекции от осадки (составлено авторами)



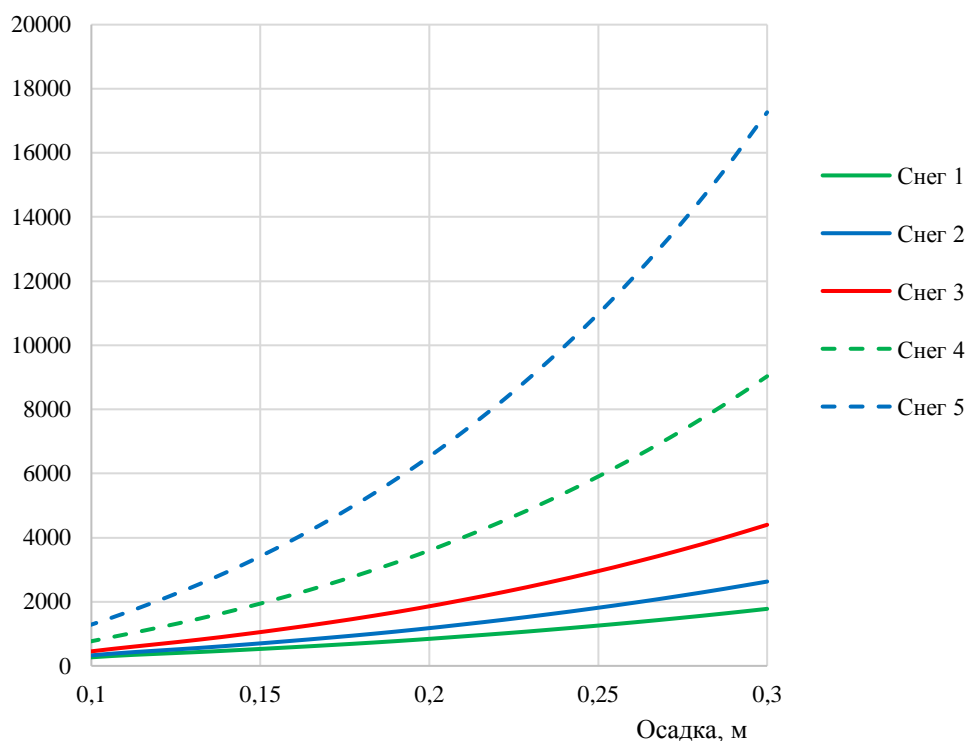
Можно выделить два характерных участка на графике:

1. участок до момента погружения базового цилиндра. Характеризуется почти линейным ростом площади контакта и ее проекции;
2. участок после контакта базового цилиндра. Характеризуется сильным приращением площади контакта и проекции с постепенным переходом в линейное нарастание.

Важно отметить, что на втором участке погружения характер нарастания площади горизонтальной проекции замедляется к определенному моменту, после которого допускать дальнейшее погружение роторно-винтового движителя в опорное основание не рационально.

Погружение движителя в значительной степени определяет силы сопротивления движению и проходимость машины в целом. Большую роль в уменьшении сил сопротивления на колееобразование играет форма носового наконечника, которая не должна допускать бульдозерного эффекта [8]. В таком случае силу сопротивления колееобразования можно определить, как проекцию на ось движителя нормальных реакций на носовом наконечнике. По мере погружения в снег силы сопротивления также будут увеличиваться, характер этой зависимости для различных вариантов плотности снега приведен на рисунке 6.

**Сила сопротивления колееобразованию, Н**



**Рисунок 6.** Зависимость силы сопротивления колееобразования от осадки (составлено авторами)

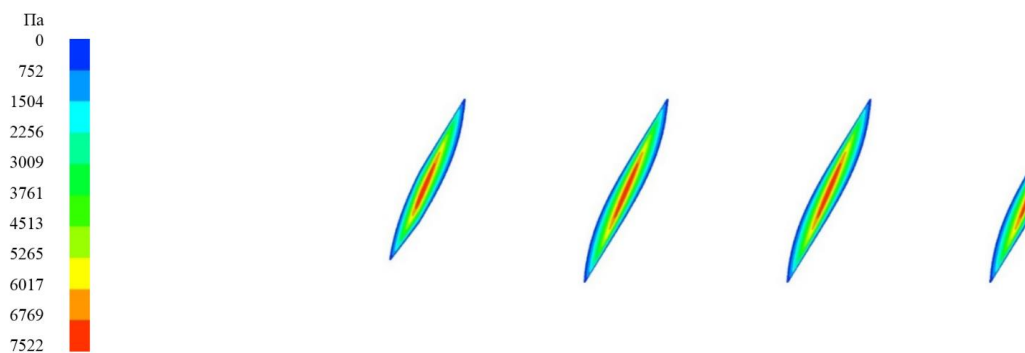
### **Напряжения в пятне контакта роторно-винтового движителя со снегом при осадке**

Важной составляющей процесса погружения различных движителей в опорное основание является характер распределения нормальных давлений в пятне контакта. Степень нелинейности нормальных давлений способна существенно повлиять на величину осадки машины и развиваемые ею тяговые усилия, зависящие от сил прижатия движителя к опорному

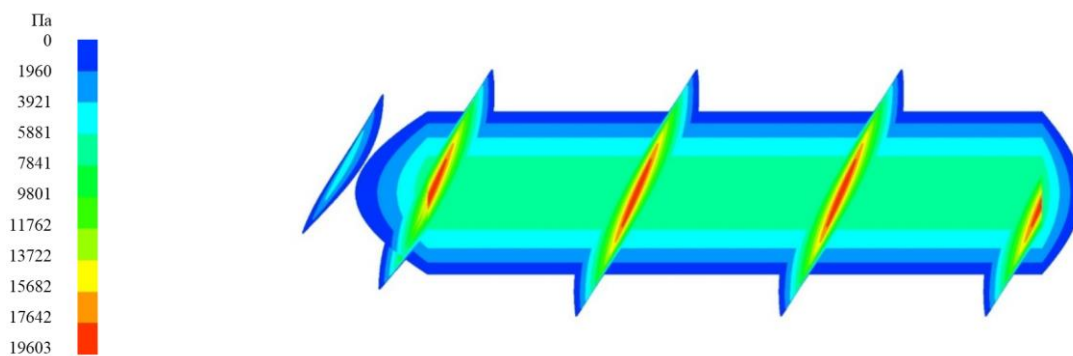
основанию в элементарных площадках контакта. Следует отметить, что данный вопрос детально исследован в отношении колесных и гусеничных машин, однако характер распределения нормальных давлений на поверхность роторно-винтового движителя со стороны опорного основания в литературе раскрыт недостаточно полно.

Учет действия сил трения позволяет уточнить величины напряжений в пятне контакта, что является важным при определении нагрузочных режимов, например, при проведении прочностных расчетов. Разработанная математическая модель роторно-винтового движителя и расчетные схемы взаимодействия со снегом, позволяют произвести расчетно-теоретическое определение величин напряжений, действующих на движитель в пятне контакта со снегом.

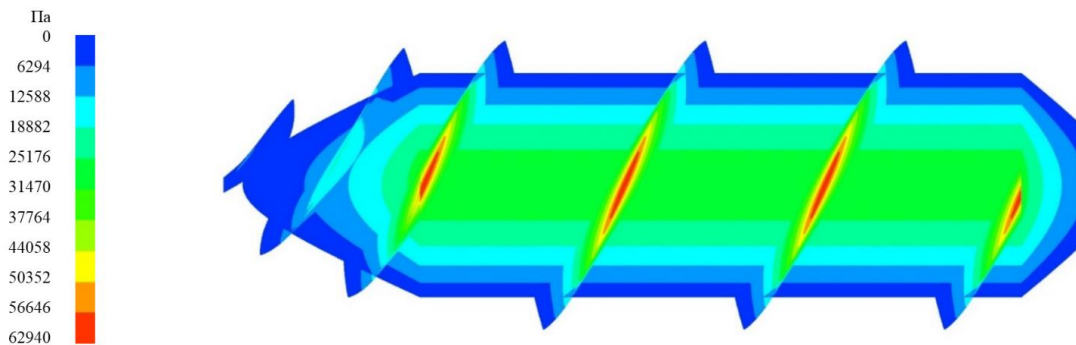
На рисунках 7...9 представлены результаты расчета нормальных давлений для различных уровней погружения роторно-винтового движителя в Снег-5 (в долях от радиуса движителя).



**Рисунок 7.** Напряжения в пятне контакта РВД со Снегом-5 при осадке, равной 0,2 гРВД (составлено авторами)



**Рисунок 8.** Напряжения в пятне контакта РВД со Снегом-5 при осадке, равной 0,4 гРВД (составлено авторами)

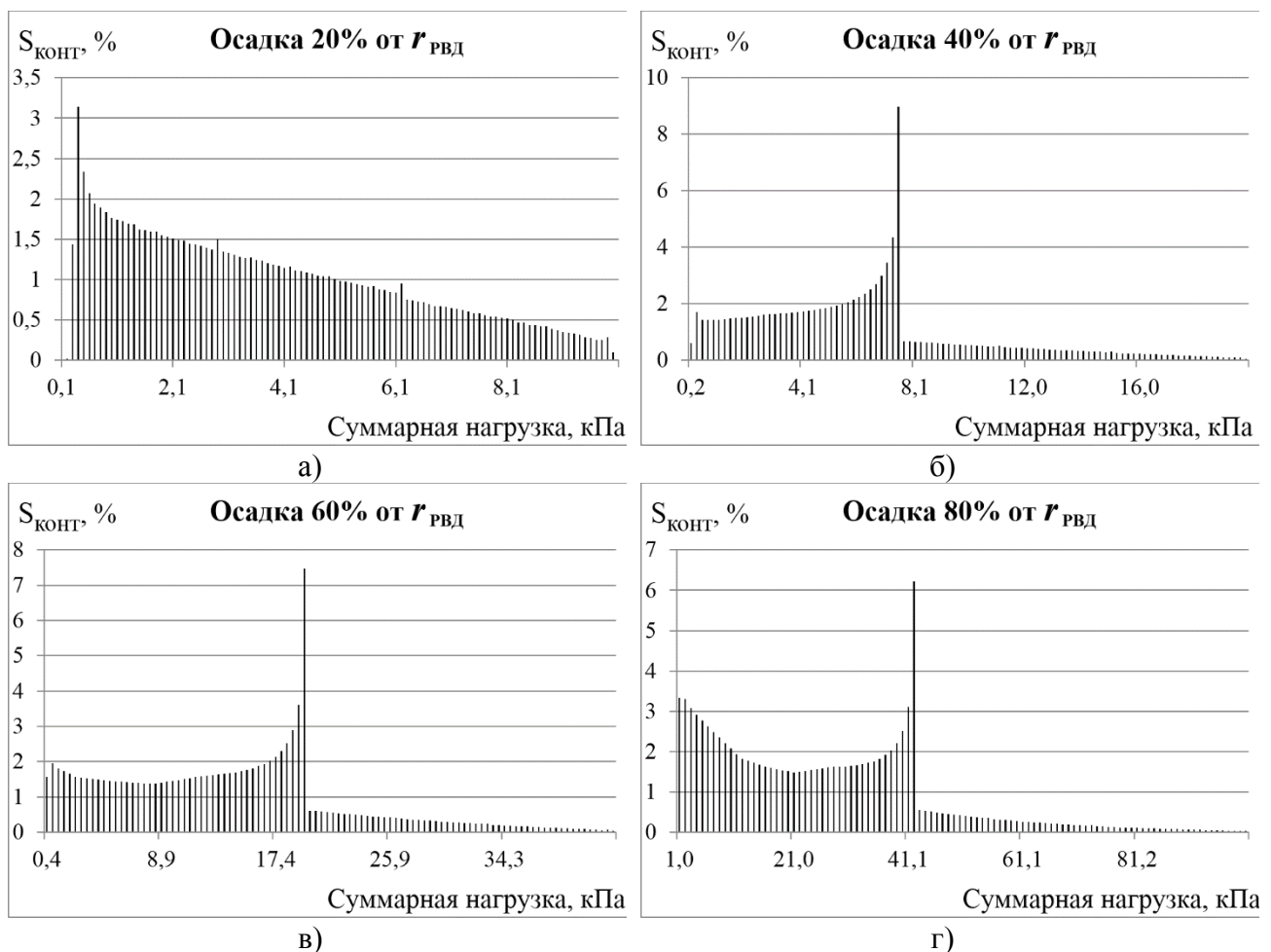


**Рисунок 9.** Напряжения в пятне контакта РВД со Снегом-5 при осадке, равной 0,7 гРВД (составлено авторами)

Контакт базового цилиндра со снегом приводит к значительному приросту площади контакта (рисунок 5) и как следствие к резкому перераспределению напряжений по пятну контакта. В соответствии с результатами проведенных расчетов суммарное напряжение в самой нижней точке базового цилиндра остается относительно низким даже при значительных уровнях осадки.

Полученный результат расчета полностью согласуется с результатами экспериментальных исследований, проведенных в НГТУ в предыдущие годы [3]. Давление под движителем даже при значительных уровнях погружения не превышает 0,1 МПа, что косвенно свидетельствует о корректности полученных результатов расчета.

На основе проведенных расчетов становится возможным количественно оценить характер изменения давления под движителем при помощи гистограмм, построенных для различных уровней погружения (рисунок 10). На графиках представлены зависимости распределения суммарных нагрузок по различным участкам поверхности контакта, выраженным в процентах от общей площади.



**Рисунок 10.** Гистограмма нагрузок в пятне контакта РВД со снегом при различных осадках (составлено авторами)

Полученные гистограммы позволяют сделать вывод о том, что суммарные напряжения на поверхности винтовой лопасти распространяют свое влияние на незначительную часть площади контакта с опорным основанием, а уровни максимальных напряжений на поверхности винтовых лопастей вдвое превышают таковые для базового цилиндра. Данный вывод важен уточнения результатов прочностных расчетов и выбора режимов нагружения роторно-винтового движителя.

### Заключение

На основе проведенных исследований можно сделать следующие заключения. Представление поверхности движителя в виде классического цилиндра дает наименее точные результаты – расхождение с результатом, полученным для точной поверхности достигает порядка 10 %.

Для начальных стадий проектирования движителя при определении габаритных и определяющих геометрических размеров рекомендуется использовать упрощенное описание формы движителя – классический цилиндр, содержащий наконечники, но не винтовые лопасти. Подобный прием позволит значительно ускорить скорость расчета при малых отклонениях от результатов, полученных с помощью детализированной модели поверхности движителя.

Для неподвижного ротора, погруженного в снег доля вертикальной составляющей силы трения достигает порядка 15 % от общей реакции снега.

Представленный в настоящей работе способ расчета осадки позволяет учесть влияние сил трения и применим для детализированного описания поверхности роторно-винтового движителя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Куляшов А. П. Специальные строительные-дорожные машины с роторно-винтовым движителем: дисс... докт. техн. наук. – Горький: ГПИ, 1986. – 327 с.
2. Шапкин В. А. Основы теории движения машин с роторно-винтовым движителем по заснеженной местности: дисс... докт. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2001. – 390 с.
3. Роторно-винтовые машины. Основы теории движения / Донато И. О., Жук В. А., Кузнецов Б. В., Куляшов А. П., Шапкин В. А., Щербаков Ю. В. – Н. Новгород, НПК, 2000. – 451 с.
4. Кошарный Н. Ф. Технично-эксплуатационные свойства автомобилей высокой проходимости. – Киев.: Вища школа, 1981. – 208 с.
5. Mitsui archimedean screw tractor. Mitsui engineering and shipbuilding co. 1983.
6. Крживицкий А. А. Снегоходные машины. – М.: Машгиз, 1949 – 236 с.
7. Снегоходные машины / Барахтанов Л. В., Ершов В. И., Куляшов А. П., Рукавишников С. В. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.
8. Кошурина А. А. Методика расчета сопротивлений движению роторно-винтовых машин: дисс... канд. техн. наук: 05.05.04. – М., 1990. – 223 с.
9. Крашенинников М. С. Математическая модель роторно-винтового движителя // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – Т. 8, № 4 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/50TVN416.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
10. Войтковский К. Ф. Механические свойства снега. – М.: Наука, 1977. – 128 с.
11. Рихтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. – М.: Изд-во АН СССР, 1945. – 120 с.
12. Снег: пер. с англ. / Под ред. В. М. Катлякова. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 751 с.
13. Малыгин В. А. Исследование процесса деформации снега под воздействием гусеничного движителя и обоснование выбора размеров опорной поверхности гусениц снегоходных машин: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Горький, 1971. – 155 с.
14. Характеристики снега как полотна пути / Барахтанов Л. В., Блохин А. Н., Манянин С. Е., Тропин С. Л. – Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2016 – 252 с.

### **Krashennikov Maxim Sergeevich**

Nizhny Novgorod state technical university named after R.E. Alekseev, Russia, Nizhny Novgorod  
E-mail: maxim.krashennikov@mail.ru

### **Barakhtanov Lev Vasilyevich**

Nizhny Novgorod state technical university named after R.E. Alekseev, Russia, Nizhny Novgorod  
E-mail: barakhtanov@yandex.ru

## **Calculating the immersion of a rotary-screw mover into the snow**

**Abstract.** This work is a logical continuation of the research aimed at improving the accuracy of modeling the interaction processes of the rotary-screw mover with snow. In this paper, we describe the results of a mathematical modeling of the mover interaction using the previously developed detailed mathematical model of the rotary-screw mover surface. The dependence of the resistance force on the formation of the track from the value of immersion in snow is shown.

For rotary-screw machines, the interaction of the mover in the support base is of great importance, since with its growth there are two principal processes:

1. The forces of resistance to movement increase (friction, rutting). In this respect, the rotary-screw mover is comparable with wheel and caterpillar types of movers.
2. The contact area of the active face of the blade realizing the thrust force is increased. This circumstance distinguishes the rotary-screw mover from wheeled or caterpillar-type movers.

To model the interaction in snow, approved models of the physio-mechanical characteristics of snow were used, and a refined scheme for the interaction of snow with an elementary surface of the mover surface was proposed.

As a result of the research, it was established that the accuracy of the geometric description of the surface of the rotary-screw mover influence the result of calculating snowfall. The traditional representation of the surface of the mover in the form of a classical cylinder gives the least accurate results in calculating the precipitate – the discrepancy with the result obtained for an exact surface reaches about 10 %.

The account of frictional forces showed their essential role in the formation of the total snow reaction. For a stationary rotor immersed in snow, their level reaches about 15 % of the total snow reaction.

The method of calculating the interaction presented in this paper allows one to take into account the effect of frictional forces and is applicable for a detailed description of the surface of the rotary-screw mover.

**Keywords:** rotary-screw mover; support base; immersion; mathematical simulation; surface; strain stress; friction force