

**У.Ш. Вахидов, А.В. Согин, В.А. Шапкин, Ю.В. Шапкина, А.А. Липин**  
**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ**  
**ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**  
**С РОТОРНО-ВИНТОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

В работе представлены результаты теоретических исследований движения роторно-винтовых машин в битом льду. Разработана предварительная математическая модель сопротивления, позволяющая подойти к расчету затрат мощности на преодоление сопротивления корпуса в мелкобитом льду и среди льдин относительно больших размеров. Дано описание взаимодействия роторно-винтового движителя с водно-ледовой средой, что позволяет сделать прогноз влияния реальных факторов на тяговые и энергетические параметры роторно-винтовых машин при движении в битом льду. Получены зависимости, позволяющие определить рациональные конструктивные параметры транспортно-технологических роторно-винтовых машин. Обозначены перспективы разработки единого автоматизированного подхода к проектированию сложных роторно-винтовых транспортно-технологических средств.

**Ключевые слова:** конструктивные параметры, роторно-винтовые машины, роторно-винтовые движители, сопротивление движению, диаметр базового цилиндра, высота и угол навивки лопасти

### **Введение**

Аналитическая оценка воздействия битого льда на тяговые (скоростные) свойства и сопротивление движению роторно-винтовых машин (РВМ) затруднительна. Достоверность результатов может гарантироваться математической моделью, весьма точно отражающей изменение водоизмещения, сопротивления перемещения корпуса, роторов, а также взаимодействия роторов с водно-ледовой средой при условии влияния многих реальных факторов, таких как скорость движения, размер кусков льда, его сплоченность и многих других.

Поэтому в статье предложена предварительная математическая модель сопротивления, которая позволит подойти к расчету затрат мощности на преодоление сопротивления корпуса в мелкобитом льду и среди льдин относительно больших размеров, а также наметить весьма трудоемкую комплексную программу проведения исследований, проектирования, производства и испытаний транспортно-технологических машин с роторно-винтовым движителем (РВД) [1,2].

### **Аналитические модели**

Сопротивление битого льда при движении корпуса машины представим тремя составляющими [3,4]:

$$R_{\text{ол}} = R_{\text{ст}} + R_{\text{д}} + R_{\text{тр}}$$

при этом влиянием отдельных составляющих друг на друга пренебрегаем.

Статическая составляющая  $R_{\text{ст}}$  зависит от давления частиц льда на лобовую плоскость, расположенную под углом атаки  $\alpha$ ; динамическая  $R_{\text{д}}$  - связана со скоростным воздействием битого льда на поверхность корпуса;  $R_{\text{тр}}$  - представляет собой составляющую трения притопленного днищем машины льда о его поверхность.

Будем полагать, что движение машины может происходить во льдах двух возможных состояний:

1) в мелкобитом льду, когда размеры частиц не превышают  $(5\div 7)\times h$ , где  $h$  - толщина льда;

2) в крупнобитом льду, когда длина отдельной льдины превышает  $(5\div 7)\times h$ .

### Составляющие сопротивления движению в мелкобитом льду

В аналитических моделях мелкобитому льду припишем свойства однородности и изотропности [3]. Положение корпуса в мелкобитом льду и действующие на него силы представим схематично (рис.1). Распором льдин при их повороте, притапливании и раздвигании можно пренебречь. Плоский контур корпуса разобьем на три части и будем считать состоящим из носовой поверхности, горизонтального днища и кормовой поверхности. Отрыв льда от кормовой поверхности обусловлен низкой скоростью всплытия притопленных днищем льдин.

Со стороны элемента льда на контур корпуса действуют нормальные силы и силы трения. Возникновение этих сил при  $v \rightarrow 0$  обусловлено плавучестью частиц льда. При скоростях, отличных от нуля, образование сил взаимодействия обусловлено и динамическим воздействием льда на контур.

1. Статическая составляющая сопротивления. Ввиду отрыва слоя гранулированного льда от кормового обреза днища, его контакта с кормовой наклонной поверхностью не происходит. При рассмотрении взаимодействия нижней ветви контура (днища) с гранулированным льдом будем считать, что слой льда притоплен днищем на глубину  $h_0$ .

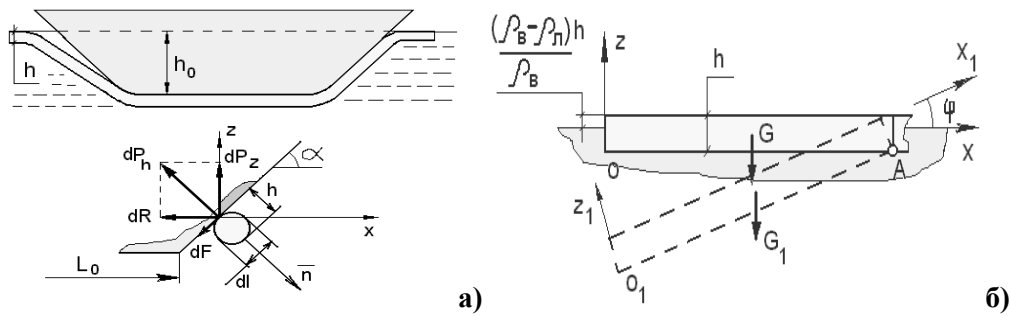


Рис. 1. Взаимодействие с РВМ: а) мелкобитого льда, б) крупнобитого льда

Таким образом, статическая составляющая сопротивления при движении в гранулированном льду может быть представлена суммой:

$$R_{cm} = R_{cm_1} + R_{cm_2},$$

где  $R_{cm_1}$  – сопротивление от взаимодействия носовой ветви контура,  $R_{cm_2}$  – сопротивление от взаимодействия нижней ветви контура (днища).

$$R_{cm_1} = (\rho_e - \rho_l)ghh_0 \left( \frac{f}{\sin \alpha} + \frac{1}{\cos \alpha} \right),$$

$$R_{cm_2} = f(\rho_e - \rho_l)ghh_0L_0,$$

где  $L_0$  – длина днища, контактирующего со льдом,  $f$  – коэффициент трения материала корпуса об лед.

2. Динамическая составляющая сопротивления. При определении составляющей, зависящей от скорости, считаем движение судна установившимся. При контакте носового участка контура со льдом частицы льда получают в направлении оси  $Oz$  скорость, равную  $V_z = Vtg\alpha$ . На элемент льда действует импульс, сообщаящий ему поступательное движение в вертикальном направлении:  $P_z \delta t = V_z \delta m$ ,  $\delta m = \rho_l h \delta x_1$ , где  $P_z$  – величина элементарной силы в направлении оси  $z$ ,  $x_1$  – протяженность элемента льда. Сила, действующая на единицу ши-

рины носовой поверхности корпуса  $P_z = -\rho_l h V^2 \operatorname{tg} \alpha$ . Элементарная нормальная сила  $P_H = P_z \cos^{-1} \alpha = -\rho_l h V^2 \cos^{-2} \alpha$ , сила трения от динамического давления  $F = -f P_H$ .

Полная величина контактного давления

$$P = \sqrt{P_H^2 + F^2} = -\rho_l h V^2 \cos^{-2} \alpha \sqrt{1 + f^2},$$

а динамическое сопротивление

$$R_o = P_H \sin \alpha + F \cos \alpha = \rho_l h V^2 \operatorname{tg} \alpha (f + \operatorname{tg} \alpha) B_k,$$

где  $B_k$  – ширина корпуса на уровне ватерлинии.

Таким образом, динамическое сопротивление связано с непрерывным перемещением частиц льда в вертикальной плоскости.

### Сопротивление движению в крупнобитом льду

При движении машины в поле битого льда льдины, соприкасающиеся с носовым контуром, поворачиваются и притапливаются. Вследствие этого возникают статическая и динамическая составляющие сопротивления движению.

Определим статическую составляющую от поворота льдин по схеме взаимодействия, представленной на рис. 1 б. Поле битого льда будем считать однородным, постоянной толщины и десятибалльной сплоченности, а форму в плане отдельных льдин - прямоугольной. Корпус машины недеформирующийся. Размер отдельных льдин: длина  $l_l$  и ширина  $b_l$ . Под воздействием горизонтальных усилий отдельные льдины, расположенные друг за другом будут контактировать между собой в точке  $A$  (рис. 1 б), образуя локальную область распора. Эту зону контакта будем полагать шарниром.

Поворот льдины будет происходить до тех пор, пока ее верхняя грань не взойдет под днище. После этого, при дальнейшем продвижении машины льдина будет притапливаться при действии вертикального давления (необходимое условие  $\sum P_i > fR$ , где  $fR$  - вертикальная реакция в шарнире  $A$ ). Предельный угол поворота льдины  $\varphi = \operatorname{arctg}(h_0/l_l)$ .

1. Статическое сопротивление повороту льдины зависит от восстанавливающего момента  $M_B$ . Считаем, что при действии кренящей пары наклоненные льдины будут не равно объемные. Эти наклонения можно разбить на два этапа.

Первый – от начала наклонения, ( $\varphi = 0$ ) до угла входа в воду верхней грани льдины

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{(\rho_e - \rho_l)h}{\rho_e l_l}.$$

В этом случае восстанавливающий момент будет максимальным и равным

$$M_{B_1} = \frac{1}{3} \rho_e g l_l^2 \left( \frac{\rho_e - \rho_l}{\rho_e} \right)^2 h B_k.$$

Второй этап – наклонение начинается с угла  $\varphi_1$  и заканчивается полным входом дополнительного объема в воду, соответствующим углу (рис. 1б):  $\varphi_2 = \arccos \frac{\rho_l}{\rho_e}$ . Не вошедший в воду объем при наклонениях на угол  $\varphi$  на проекции заштрихован  $V = 0,5acB_k$ , а его момент относительно подвижной системы (точки  $A_1$ ):  $M = V(l_l - 0,333c)$ .

$$a = h \left( 1 - \frac{\rho_l}{\rho_e \cos \varphi_2} \right), c = a \cdot \operatorname{ctg} \varphi_2.$$

Восстанавливающий момент при наклонах от угла  $\varphi_1$  до угла  $\varphi_2$  будет

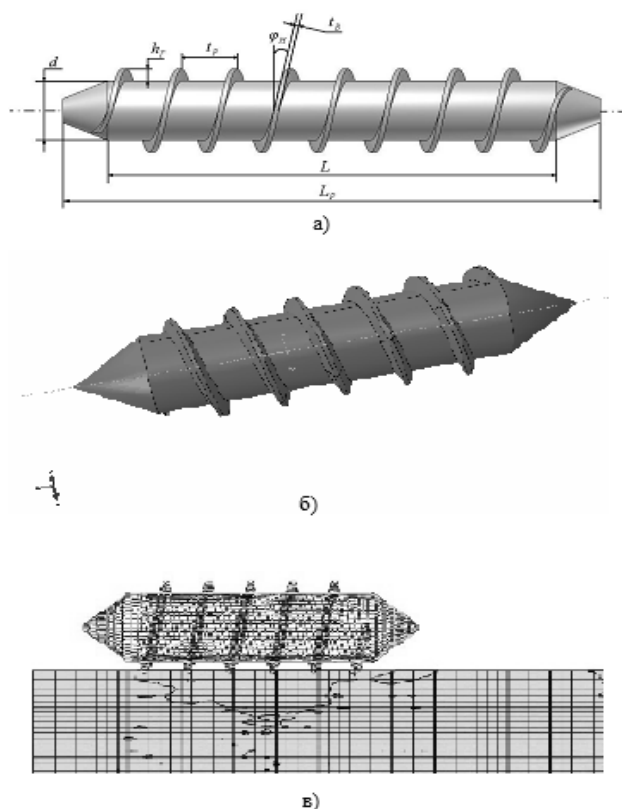
$$M_{e_2} = \rho_e g (h l_l B_k - 0,5ac B_k) x_c,$$

где  $x_c$  – изменение координат центра приложения дополнительных сил плавучести.

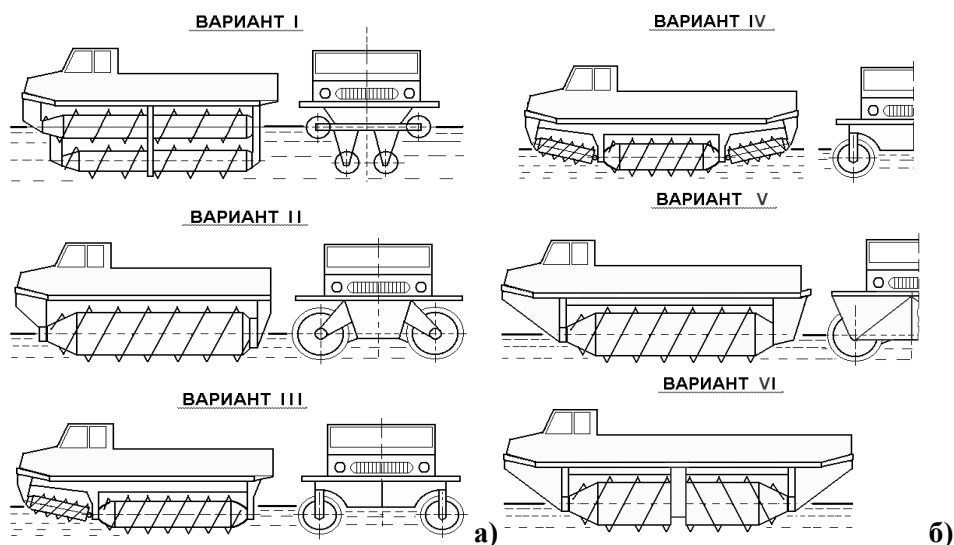
В условиях равновесия восстанавливающий момент компенсируется моментом, кротящим льдину. Поскольку общее сопротивление от поворота льдины зависит от угла поворота и, следовательно, от времени, то, очевидно, необходимо ввести среднее значение сопротивления от поворота льдины, равное  $\bar{R}_л = \frac{1}{l_l} \int_0^{\varphi} M_с \partial\varphi$ .

Импульсная составляющая сопротивления приближенно может быть определена следующим образом. При контакте с носовым контуром машины льдины получают в направлении оси  $z$  скорость  $V_z$  и поворачиваются вокруг оси  $A$ . На элемент льда действует импульс, сообщаящий ему вращательное движение. Этому импульсу соответствует момент  $M_д$ , приложенный к корпусу машины. Для его определения воспользуемся законом изменения момента количества движения и получим:  $M_д = l_n^{-1} \rho_n h V^2 t g \alpha \rho^2$ , а импульсное сопротивление определится формулой:  $R_u = l_n^{-1} M_д (t g \alpha + f)$

Приведенная методика расчета сопротивления движения корпуса машины в крупнобитом льду не учитывает явлений распора льдин и захвата льда элементами корпуса.



**Рис. 2. Моделирование роторно-винтового движителя: а) некоторые изменяемые в модели параметры РВД:  $d$  – диаметр базового цилиндра ротора;  $L$  – длина базового цилиндра ротора;  $L_p$  – общая длина ротора;  $h_Г$  – высота винтовой лопасти шнека;  $\varphi_Н$  – угол подъема винтовой лопасти у ее основания;  $t_Г$  – шаг винтовой лопасти;  $t_В$  – толщина винтовой лопасти [4], б) расчетная модель РВД, построенная с применением программного пакета *ABAQUS*, в) предварительные результаты моделирования РВД [5].**



**Рис. 3. Варианты конструкции движителя для роторно-винтовых машин:**  
**а) варианты (I-III)                      б) варианты (IV-VI)**

### **Выбор вариантов для моделирования**

Все расчеты проводились с целью выявления влияния тех или иных конструктивных параметров движения на тягово-сцепные свойства машины [6,4].

Разработанные методики апробированы на шести вариантах конструкции роторно-винтовой машины (рис. 3). Это позволило решить две частные задачи: во-первых, сделать окончательный выбор базового варианта для дальнейших исследований, а во-вторых, выделить те параметры, которые наиболее существенно влияют на плавучесть, проходимость, тягу, потребляемую мощность и КПД.

В качестве переменных параметров были приняты: масса машины, диаметр базового цилиндра, высота и угол навивки лопасти (рис.2), на воде исследовалось также относительное погружение роторов, а при выходе на лед из полыньи - угол атаки лобовой поверхности корпуса. Все варьируемые параметры задавались в широких диапазонах, чтобы с одной стороны обеспечить охват допустимых или возможных пределов, а с другой - выявить рациональные (оптимальные) области их числовых значений [2].

В расчетах прямолинейное движение на воде характеризуется сопротивлением трения и формы потребляемой мощностью, оборотами ротора, крутящим моментом [1,4,6]. В качестве переменного параметра выбрана скорость движения, которая для всех конструкций транспортно-технологических средств, изменяется в диапазоне от 0,75...3,0 м/с. По результатам математического моделирования были построены таблицы значений и графики изменений параметров.

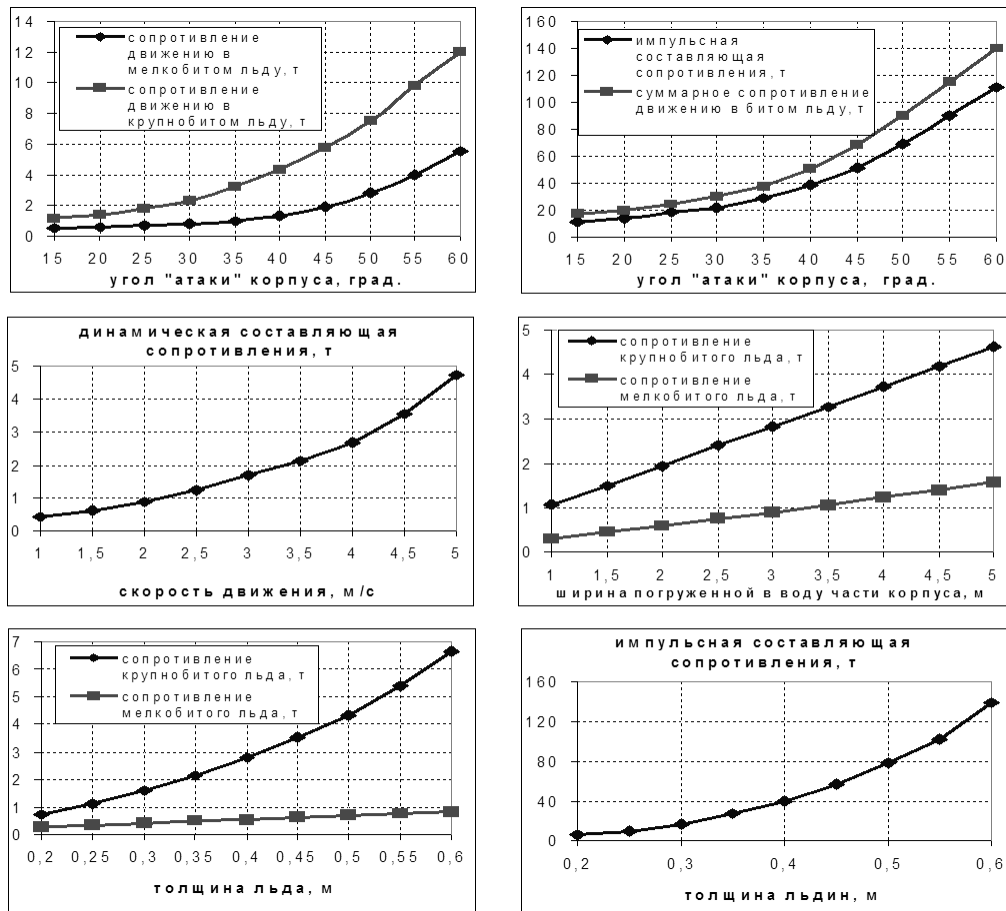
Характер изменения указанных параметров практически не зависит от анализируемой конструктивной схемы [2,5], но их численные значения существенно различаются, что наглядно иллюстрируют диаграммы рис. 4. Расчеты показали, что предпочтительным является вариант VI конструкции.

## Анализ результатов расчетов

Методика расчета предполагает определение сил сопротивления движению в мелкобитом и крупнобитом льду. В обоих случаях вычисляются статическая и динамическая (импульсная) составляющие. Как показал расчет численных величин сил сопротивления движению в битом льду корпуса РВМ (выполненного по варианту VI), большинство этих сил существенно зависит от угла атаки корпуса  $\alpha$ , скорости движения на воде  $v$ , размера льдин (принято допущение, что длина  $l_{л}$ , крупно битой льдины равна шести её толщине  $h_{л}$ ), ширины погружения в воду части корпуса  $B_{к}$ . Причем, в некоторых случаях силы сопротивления (очевидно, удара) принимают значения опасные для прочности корпуса.

Общая ледовая обстановка, принятая при математическом моделировании: толщина льда - 0,3 м, для мелкобитого льда  $l_{л} = h_{л}$ , для крупнобитого -  $l_{л} = 6h_{л}$ . Геометрические размеры РВМ: ширина погруженной в воду части корпуса  $B_{к} = 1,7$  м, угол атаки  $\alpha = 30^{\circ}$ . Скорость движения РВМ  $v = 1$  м/с. Влияние каждого из этих параметров на характеристики движения РВМ в битом льду проанализировано в широком диапазоне изменения значений [4,6].

1. Влияние угла атаки  $\alpha$  выявлено в интервале от  $11^{\circ}$  до  $57^{\circ}$ . В мелкобитом льду сопротивление нарастает от 0,157 т до 4,49 т (рис. 4). В крупнобитом льду, как показывает график, и сопротивление нарастает более интенсивно, и его абсолютное значение достигает 11,4 т. График суммарного сопротивления  $R_{\Sigma}$  показывает, что наиболее опасной является импульсная составляющая - при угле  $\alpha = 40^{\circ}$   $R_{\Sigma}$  превышает 40-тонный рубеж (вдвое больше веса модели), а при  $\alpha = 57^{\circ}$   $R_{\Sigma} = 143$  т.



**Рис. 4. Параметры движения РВМ в битом льду**

2. Скорость движения модели РВМ в битом льду определяет значения динамической составляющей сопротивления. В общем случае она пропорциональна квадрату скорости, что отражает график на рис. 4. В диапазоне скорости от 1 до 5 м/с сопротивление в мелкобитом льду возрастает в 10 раз - от 0,419 т до 4,72 т.

3. Своеобразие влияния толщины льда  $h_{\text{Л}}$  состоит в том, что в зависимости от соотношения  $l_{\text{Л}}/h_{\text{Л}}$  применяется та или иная гипотеза взаимодействия обвода корпуса со льдом. Если  $l_{\text{Л}}/h_{\text{Л}} < 6$ , считаем лед мелкобитым и согласно расчетной схеме сопротивление линейно зависит от  $h_{\text{Л}}$ , медленно возрастаая. При увеличении толщины льда от 0,2 до 0,5 м сопротивление  $R_{S_1}$  возрастает от 0,28 т до 0,839 т., т.е. примерно в 3 раза. Если же мы учитываем размеры льдины, рассматриваем процесс крена и импульсного перемещения льдины в воде, то характер изменения сопротивления становится принципиально иным, принимая вид параболы. В нашем случае, учитывая 10-балльную сплоченность льда, только статическое сопротивление льдин размером  $l_{\text{Л}} = 6h_{\text{Л}}$  при тех же пределах изменения толщины льда возросло от 0,74 до 6,66 т. Импульсная же составляющая возросла в 27 раз - с 5,88 до 159 т., что равносильно удару в непреодолимое препятствие. Столь существенные различия в составляющих сопротивления, очевидно, должны быть обоснованы экспериментально.

4. Что касается параметра  $B_K$  (ширины погруженной в воду части корпуса машины), то, не влияя на импульсную составляющую, увеличение  $B_K$  ведет к росту других составляющих сопротивления, причем для крупнобитого льда этот рост более заметен.

Таким образом, не смотря на приближенный характер оценки возможность движения РВМ в битом льду, удалось выявить различие принятых расчетных схем и определить порядок величин сопротивления движению от воздействия льда на корпус РВМ.

### *Библиографический список*

1. **Наумов, В.Н.** Моделирование прямолинейного движения транспортно-технологического средства с роторно-винтовым двигателем [Текст] / В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, К.Е. Бяков // МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. №12. С. 31-35.
2. **Шапкина, Ю.В.** Параметры шума и вибрации транспортных и технологических машин [Текст] / У.Ш. Вахидов, А.Г. Китов, А.В. Согин, В.А. Шапкин, Ю.В. Шапкина //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 7. С.8-11.
3. **Вахидов, У.Ш.** Машины для разработки льда, снега и мерзлого грунта: учебное пособие [Текст] / У.Ш. Вахидов, И.А. Ерасов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин. – Н. Новгород: НГТУ, 2014. – 156 с.
4. **Шапкин, В.А.** Основы теории движения машин с роторно-винтовым двигателем по заснеженной местности: дис. доктора техн. наук: 05.05.03 / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2001. – 389 с.
5. **Шапкин, В.А.** Универсальное спасательное средство с роторно-винтовым двигателем [Текст] / А.П. Куляшов, А.А. Кошурина, М.С. Крашенинников, В.А. Шапкин // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2011. № 4. С.45-50.
6. **Куклина, И.Г.** Разработка методики расчета колебаний и параметров упругой подвески транспортно-технологических роторно-винтовых машин при движении по льду [Текст] / И.Г. Куклина: дис. канд. тех. наук: 05.05.04 / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2001. – 238 с.