

УДК 629.366

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КУРСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕДОРЕЗНОЙ МАШИНЫ С ПАЛЬЦЕВОЙ ФРЕЗОЙ**

Кулепов Виктор Федорович<sup>1</sup>  
д.т.н., профессор  
Scopus Author ID: 6601981304  
РИНЦ SPIN-код: 2458-8156  
E-mail: kulepov@dpingtu.ru

Малыгин Александр Львович<sup>1</sup>  
к.т.н., доцент  
РИНЦ SPIN-код: 8208-4748  
E-mail: al.malygin.dpi@yandex.ru

Аникин Алексей Александрович<sup>1</sup>  
д.т.н.  
Scopus Author ID: 57200211568  
РИНЦ SPIN-код: 6777-7753  
E-mail: anikin.zvm@mail.ru

Орлов Лев Николаевич<sup>1</sup>  
д.т.н., профессор  
Scopus Author ID: 57203354216  
РИНЦ SPIN-код: 5419-5911  
E-mail: lev.n.orlov@mail.ru

Наумов Валерий Николаевич<sup>2</sup>  
д.т.н., профессор  
Scopus Author ID: 8947283200  
РИНЦ SPIN-код: 3089-6634  
E-mail: vn.naumov1941@yandex.ru

Коростелев Сергей Анатольевич<sup>3</sup>  
д.т.н., доцент  
Scopus Author ID: 57211492844  
РИНЦ SPIN-код: 1971-8460  
E-mail: korsan73@mail.ru

Макаров Владимир Сергеевич<sup>1</sup>  
д.т.н., доцент  
Web of Science ResearcherID: B-2739-2014  
Scopus Author ID: 55871122000  
РИНЦ SPIN-код: 9834-6239  
E-mail: makvl2010@gmail.com

<sup>1</sup> Нижнегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д.24

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, 5

<sup>3</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

UDC 629.366

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

**WAYS TO INCREASE THE ROAD-HOLDING STABILITY OF AN ICE-CUTTING VEHICLE WITH AN END CUTTER**

Kulepov Viktor Fedorovich<sup>1</sup>  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
Scopus Author ID: 6601981304  
RSCI SPIN-code: 2458-8156  
E-mail: kulepov@dpingtu.ru

Malygin Alexander Lvovich<sup>1</sup>  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
RSCI SPIN-code: 8208-4748  
E-mail: al.malygin.dpi@yandex.ru

Anikin Alexey Alexandrovich<sup>1</sup>  
Doctor of Technical Sciences  
Scopus Author ID: 57200211568  
RSCI SPIN-code: 6777-7753  
E-mail: anikin.zvm@mail.ru

Orlov Lev Nikolaevich<sup>1</sup>  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
Scopus Author ID: 57203354216  
RSCI SPIN-code: 5419-5911  
E-mail: lev.n.orlov@mail.ru

Naumov Valery Nikolaevich<sup>2</sup>  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
Scopus Author ID: 8947283200  
RSCI SPIN-code: 3089-6634  
E-mail: vn.naumov1941@yandex.ru

Korostelev Sergey Anatolievich<sup>3</sup>,  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor  
Scopus Author ID: 57211492844  
RSCI SPIN-code: 1971-8460  
E-mail: korsan73@mail.ru

Makarov Vladimir Sergeevich,  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor  
Web of Science ResearcherID: B-2739-2014  
Scopus Author ID: 55871122000  
RSCI SPIN-code: 9834-6239  
E-mail: makvl2010@gmail.com

<sup>1</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E.Alekseeva, 603155, Nizhny Novgorod, ul.Minina, 24

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, 105005, 105005, Moscow, ul.2-ya Baumanskaya, 5

<sup>3</sup> Polzunov Altai State Technical University, 656038, Barnaul, pr.Lenina, 46

В статье рассматривается ледово-фрезерная машина ЛФМ-107 созданная на базе гусеничного тягача ГАЗ-47. Приведены ее преимущества и недостатки. Основным недостатком является плохая курсовая устойчивость и постоянное отклонение от направления движения. Поэтому были проанализированы различные варианты снижения вредных факторов. Первый способ основанный на смещении фрезы относительно продольной оси машины показал, что компенсирующий момент составляет лишь 14 % от отклоняющего момента. Поэтому для обеспечения курсовой устойчивости машины, предложен фрезерный рабочий орган, состоящий из двух концентрично расположенных цилиндров, вращающихся навстречу друг другу. Приведены расчетные схемы и зависимости для определения основных параметров рабочего органа. Предложенные технические решения и математические модели позволят повысить курсовую устойчивость ледово-фрезерной машины

Ключевые слова: ЛЕДОВО-ФРЕЗЕРНАЯ МАШИНА, КУРСОВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ, РАБОЧИЙ ОРГАН

The article discusses the LFM-107 ice-cutting vehicle created on the basis of the GAZ-47 tracked tractor. Its advantages and disadvantages are given. The main disadvantage is poor road-holding stability and constant deviation from the direction of moving. Therefore, various options for reducing harmful factors were analyzed. The first method, based on the displacement of the milling cutter relative to the longitudinal axis of the vehicle, showed that the compensating moment is only 14% of the deflecting moment. Therefore, to ensure the road-holding stability of the vehicle, a milling working body consisting of two concentrically arranged cylinders rotating towards each other is proposed. Calculation schemes and dependencies for determining the main parameters of the working body are given. The proposed technical solutions and mathematical models will improve the road-holding stability of the ice-cutting vehicle

Keywords: ICE-CUTTING VEHICLE, ROAD-HOLDING STABILITY, WORKING BODY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-201-017>

## Введение

В Российской Федерации большую роль играют технологические операции, производимые с ледяным покровом необходимые для гидротехнического строительства, прокладке трубопроводов, кабельных линий, подготовке и очистке дорожных покрытий и пр. Для большинства эти операции требуются устройства для разработки ледовой поверхности, состоящие из фрез, резцов и прочих рабочих органов.

Среди большого количества машин созданных для этой цели, отметим ледово-фрезерную машину ЛФМ- 107 [1], которая долгое время выпускалась серийно на предприятиях Минречфлота. Машина создана на базе гусеничного тягача ГАЗ-47 (рис. 1) производства Заволжского завода гусеничных тягачей. При всех своих достоинствах она обладала существенным недостатком - плохой курсовой устойчивостью и постоянным отклонением от направления движения.



Рис. 1 – Фото ЛФМ-107 установленной на гусеничном тягаче ГАЗ-47

### Математическая модель

Для анализа этого явления, рассмотрим схему сил, действующих на машину со стороны рабочего органа. На рис. 2 представлен общий вид машины, состоящей из базового тягача 1, со смонтированной на нем шнекороторной установкой 2 с метателем 3. В задней части машины установлена пальцевая фреза 4 с редуктором 5.

В процессе работы машина образует прорезь шириной  $B$ , при этом на рабочий орган вращающийся с угловой скоростью  $\omega$  действует сила, раскладывающаяся на две составляющие: касательную  $P_{\tau}$  (в дальнейшем сила резания) и нормальную  $P_{\Pi}$  (в дальнейшем сила подачи).

Сила резания  $P_\tau$  на плече  $l$  создает момент

$$M = P_\tau \cdot l = 0,5P_\tau \cdot L. \quad (1)$$

Последний поворачивает машину на угол  $\varphi$  нарушая курсовую устойчивость.

Проведенные исследования [2] позволили установить зависимости силы резания  $P_\tau$  от скорости подачи  $V_{п}$ , толщины льда  $h_{л}$  и диаметра фрезы  $D_{ф}$ . Графики этих зависимостей представлены на рис. 3.

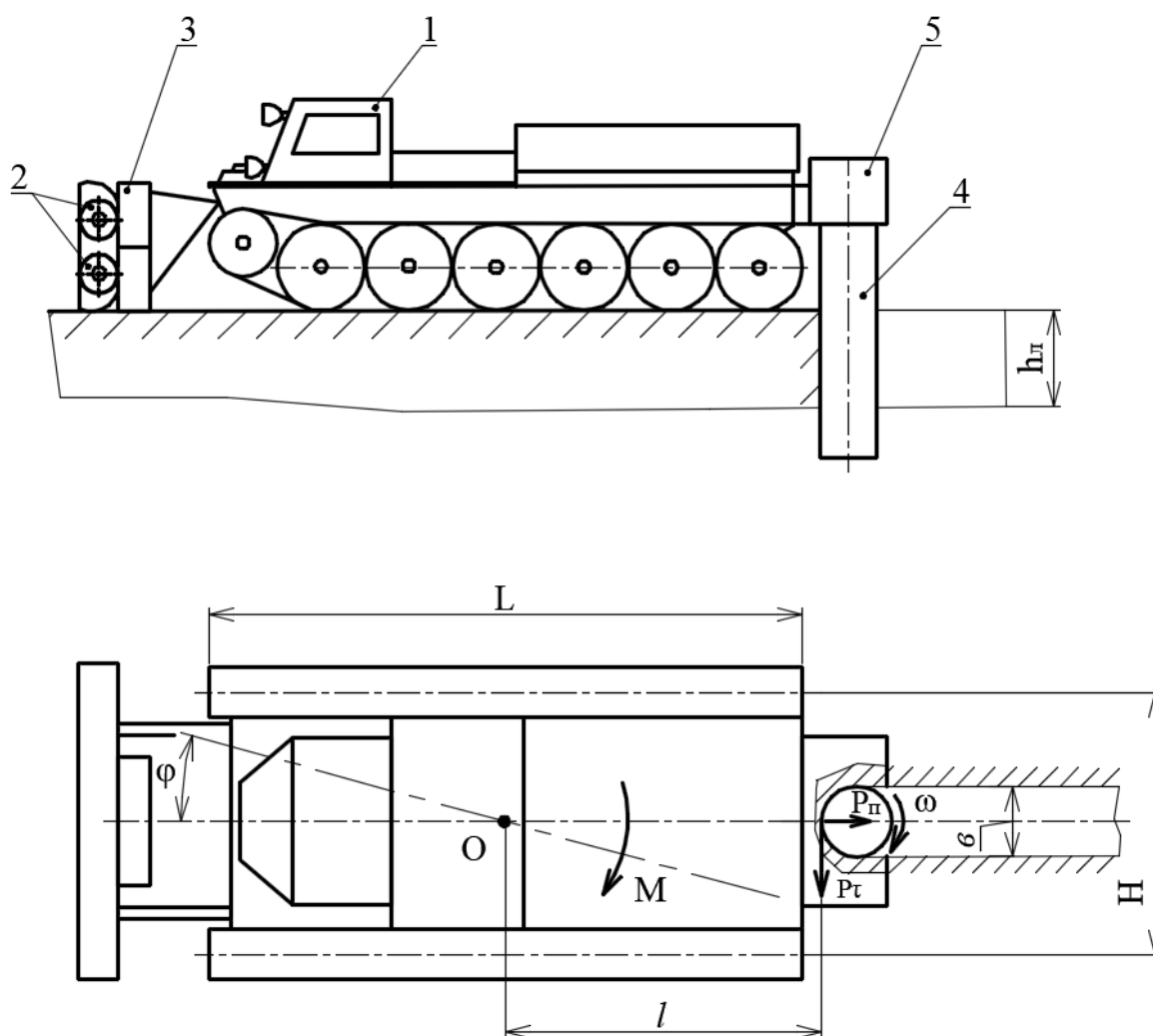


Рис. 2 - Общий вид машины ЛФМ-107

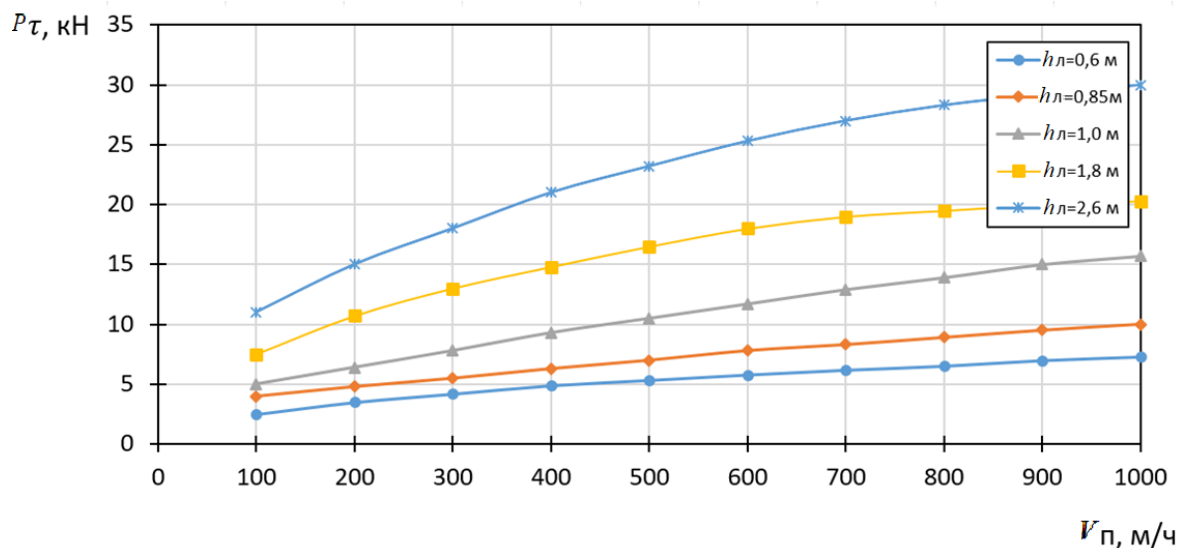


Рис. 3 - Зависимость силы резания от скорости подачи при различной толщине льда

Из графиков видно, что для машины ЛФМ-107 с фрезой диаметром  $D_{ф} = 0,3$  м; скорости подачи  $V_{п}=300$  м/ч и средней толщины льда  $h_{л}=1$  м сила резания составляет  $P_{\tau} = 8,5$  кН.

При габаритах гусеничного транспортера, являющегося базой для ледорезной машины  $L=5300$  мм и  $H=2500$  мм момент поворота, достигает большой величины и составляет  $M = 22525$  Н · м.

Одним из способов повышения курсовой устойчивости, применяемых на практике, является смещение фрезы относительно продольной оси машины рис.4.

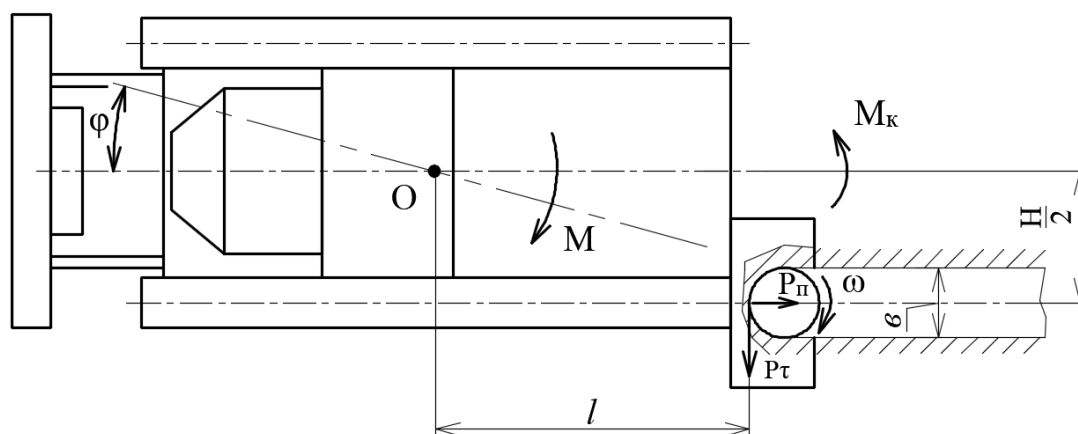


Рис. 4 - Общий вид машины со смещенной фрезой

При этом сила подачи  $P_{\Pi}$  на плече  $\frac{H}{2}$  создает компенсирующий момент

$$M_{\text{к}} = P_{\Pi} \cdot \frac{H}{2}. \quad (2)$$

Экспериментальными исследованиями [3] установлено, что

$$P_{\Pi} = \psi \cdot P_{\tau}, \quad (3)$$

где коэффициент  $\psi = 0,27 \div 0,35$ .

Принимая средние значения  $\psi = 0,3$  и  $H = 0,47L$  из (2) получим

$$M_{\text{к}} = 0,07 P_{\tau} \cdot L. \quad (4)$$

Из сравнения (2) и (4) видно, что компенсирующий момент  $M_{\text{к}}$  составляет лишь 14 % от отклоняющего момента  $M$  и не может компенсировать его влияние на курсовую устойчивость.

Рассмотрим второй, более радикальный способ повышения курсовой устойчивости машины.

Для обеспечения курсовой устойчивости машины, предложен фрезерный рабочий орган, состоящий из двух концентрично расположенных цилиндров 1 и 2, вращающихся навстречу друг другу (рис. 5).

Наружный цилиндр 2 приводится во вращение гидромотором 3 через конический редуктор 4, а внутренний цилиндр 1 - гидромотором 5 через вал 6.

При такой компоновке фрезерного рабочего органа он будет состоять из двух соосно расположенных фрез каждая из которых одновременно режет свой слой льда, расположенный в месте конкретного цилиндра фрезы. При этом силы сопротивления льда резанию приложены на каждом цилиндре фрезы противоположно друг-другу и гасят друг друга (рис.5).

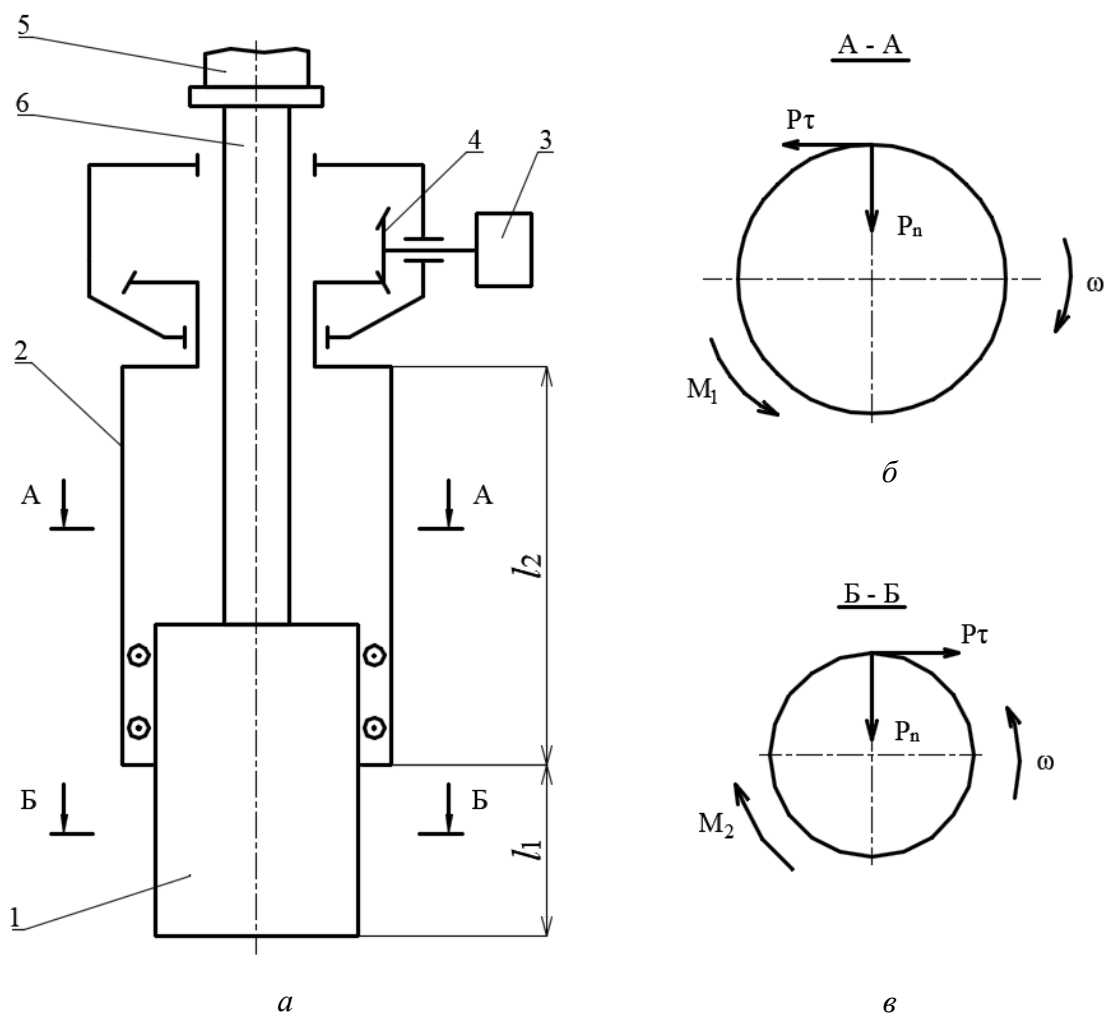


Рис. 5 – Рабочий орган: *а* - конструкция рабочего органа, *б, в* - схема сил, действующих на элементы рабочего органа

На рис. 6 показан общий вид рабочего органа. Для отвода стружки на наружных поверхностях цилиндров 1 и 2 выполнены винтовые реборды 3 с установленными на них резцами 4. При этом реборды на наружном и внутреннем цилиндрах имеют разное направление навивки.

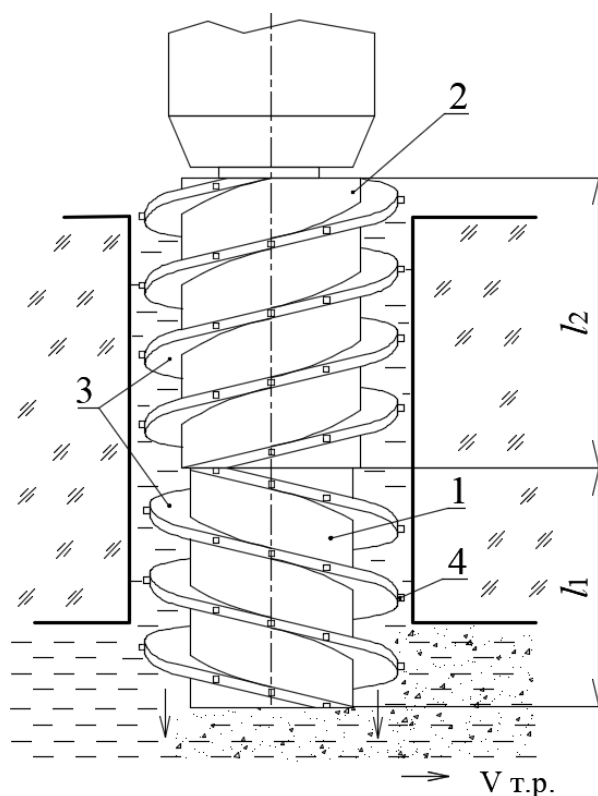


Рис. 6 - Общий вид рабочего органа

При вращении цилиндров стружка под действием винтовых реборд перемещается вниз, подхватывается течением реки  $V_{т.р.}$  и удаляется из зоны резания, предотвращая быструю смерзаемость канала.

Следует отметить, что температура льда не является постоянной по толщине льда и согласно меняется по линейному закону. Необходимо отметить, что температура на поверхности льда и температуре воздуха  $t^{\circ}_в$  равны, при этом температура его нижнего слоя принимается равной  $0^{\circ}\text{C}$ .

Проведенными исследованиями [3] установлена зависимость силы резания от температуры льда, эта зависимость носит линейный характер и может графически представлена на рис.7.



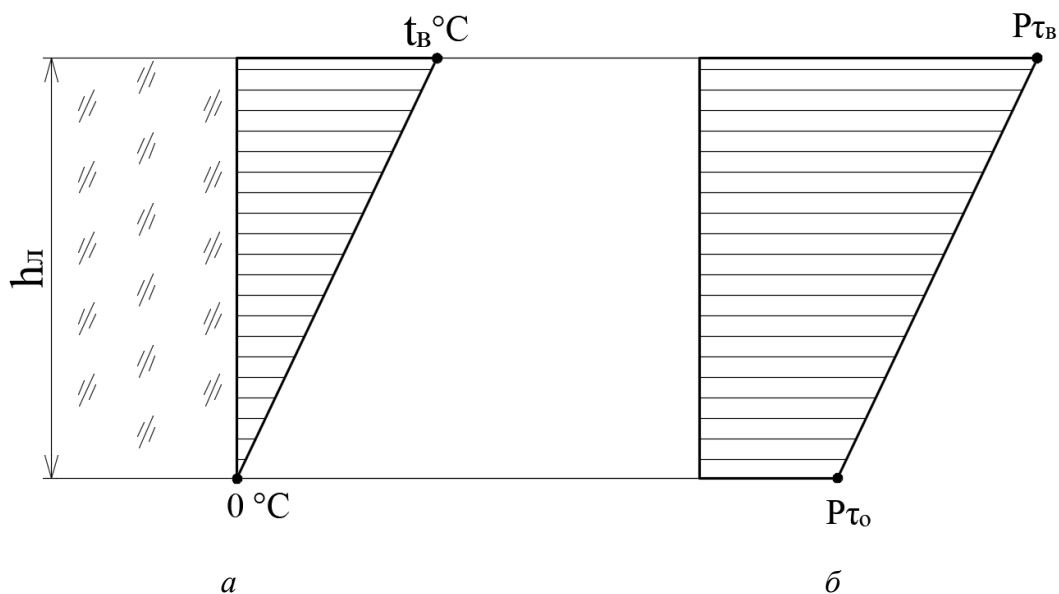


Рис. 7 - Эпюры распределения температуры, а) и силы резания, б) по толщине льда

На рис. 7 обозначены:  $t_{\text{в}}\text{ }^{\circ}$  - температура воздуха;  $P_{\tau_0}$  - сила резания льда при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{\tau_{\text{в}}}$  - сила резания льда при  $t_{\text{в}}\text{ }^{\circ}$ .

Анализ графика показывает, что сила резания верхних слоев льда больше и сила резания нижних слоев меньше. Курсовая устойчивость машины в этом случае будет обеспечена если согласно рис. 5 будет достигнуто равенство моментов  $M_1$  и  $M_2$ . Оно может быть получено за счет правильного выбора соотношения длин соосно расположенных фрез  $l_1$  и  $l_2$  (рис.5).

Зависимость силы резания от льда показан на рис. 8 и выглядит как прямоугольная трапеция с высотой  $h_{\text{л}}$  (высота льда). В дальнейшем будем полагать, что рабочая часть фрезы имеет длину  $l = h_{\text{л}}$ .

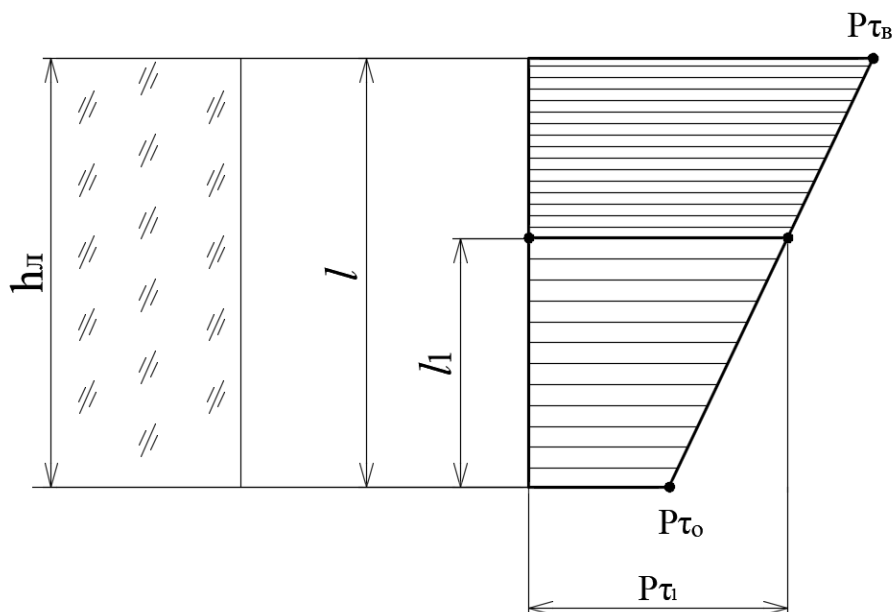


Рис. 8 - Расчетная схема для определения рационального соотношения длин соосно расположенных фрез

Проведем в трапеции линию горизонта расположенную на расстоянии  $l_1$  от её нижнего основания (рис. 8), что соответствует длине нижнего цилиндра рабочего органа (рис. 5).

Из условия равновесия данная линия должна делить трапецию на две фигуры с равными площадями.

Последнее может быть описано системой уравнений (5).

$$\begin{cases} \frac{P_{\tau 1} + P_{\tau 0}}{2} \cdot l_1 = \frac{P_{\tau 1} + P_{\tau в}}{l} \cdot (l - l_1) \\ P_{\tau 1} = P_{\tau 0} + \frac{P_{\tau в} - P_{\tau 0}}{l} \cdot l_1 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $P_{\tau 1}$  - сила резания льда в слое расположенном на расстоянии  $l_1$  от нижнего основания трапеции;  $P_{\tau 0}$  - сила резания льда при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{\tau в}$  - сила резания льда при температуре наружного воздуха  $t^{\circ}_{в}$ ;  $l$  - суммарная рабочая длина фрезы  $l = h_{л}$ ;  $l_1$  - длина нижнего цилиндра фрезы.

Система сводится к квадратичному уравнению

$$l_1^2 + \frac{2P_{\tau 0} \cdot l}{P_{\tau в} - P_{\tau 0}} - \frac{l^2}{2} \frac{P_{\tau 0} + P_{\tau в}}{P_{\tau в} - P_{\tau 0}} = 0. \quad (6)$$

В результате решения уравнения (6) получим

$$l_1 = l \left[ \frac{P_{\tau 0}}{P_{\tau B} - P_{\tau 0}} + \frac{\sqrt{P_{\tau 0}^2 + P_{\tau B}^2}}{\sqrt{2}(P_{\tau B} - P_{\tau 0})} \right]. \quad (7)$$

таким образом определится длина нижнего цилиндра. Соответственно длина верхнего цилиндра составит

$$l_2 = l - l_1 = l \left\{ 1 - \left[ \frac{P_{\tau 0}}{P_{\tau B} - P_{\tau 0}} + \frac{\sqrt{P_{\tau 0}^2 + P_{\tau B}^2}}{\sqrt{2}(P_{\tau B} - P_{\tau 0})} \right] \right\} \quad (8)$$

Полученное таким образом значение длин цилиндров соосно расположенных фрез обеспечит равенство моментов  $M_1 = M_2$  (рис. 5), что в конечном счете обеспечит курсовую устойчивость ледорезной машины с пальцевой фрезой.

### Выводы

Проведен анализ работы ледорезной машины с пальцевой фрезой на примере ЛФМ-107 установленной на гусеничном тягаче ГАЗ-47. Установлено, что существенным недостатком ее работы является плохая курсовая устойчивость. Рассмотрены возможности устранения этого недостатка. В результате предложена новая конструкция рабочего органа с ребордами и установленными на них резцами на наружном и внутреннем цилиндрах, которые имеют разное направление навивки, что в свою очередь обеспечивает стабилизацию моментов резания. Даны расчетные зависимости для определения конструктивных параметров нового рабочего органа. Предложенные решения и рекомендации позволят повысить курсовую устойчивость ледово-фрезерной машины.

### Библиографический список

1. Николаев А.Ф. Исследование и комплекс машин для разработки мерзлых грунтов, льда и снега. – Горький, 1964. – 160 с.
2. Назаровский А.А. Исследование процесса фрезерования льда концевой фрезой со встроенным шнековым транспортером: Дисс. ... канд. техн. наук. – Горький, 1972. – 245 с.
3. Романов В. В. Разработка методики расчета дискофрезерных рабочих органов ледорезных машин и выбор их основных конструктивных параметров Дисс...канд. техн. наук. - Нижний Новгород, 2007. -280 с.

### References

1. Nikolaev A.F. Issledovanie i kompleks mashin dlja razrabotki merzlyh gruntov, l'da i snega. – Gor'kij, 1964. – 160 s.
2. Nazarovskij A.A. Issledovanie processa frezerovaniya l'da koncevoj frezoy so vstroennym shnekovym transporterom: Diss. ... kand. tehn. nauk. – Gor'kij, 1972. – 245 s.
3. Romanov V. V. Razrabotka metodiki rascheta diskofrezernyh rabochih organov ledoreznyh mashin i vybor ih osnovnyh konstruktivnyh parametrov Diss...kand. tehn. nauk. - Nizhnij Novgorod, 2007. -280 s.