ISSN 1817-7204 (print)

МЕХАНІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 631.62:631.311.51.02

Поступила в редакцию 29.09.2016
Received 29.09.2016

А. Н. Басаревский, К. А. Кравченин

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства, Минск, Республика Беларусь

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ, РАЗВИВАЕМОЙ НОЖАМИ РОТАЦИОННОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА КАНАЛООЧИСТИТЕЛЯ

В настоящее время площадь осушенных земель в мире превышает 210 млн га. В США осушено около 60 млн га земель, в странах Европы обрабатываемые земли мелиорированы на 80–100 %. В Республике Беларусь площадь мелиорированных земель составляет около 2,9 млн га, на них производится более трети продукции растениеводства. Однако в условиях длительной эксплуатации состояние осушенных угодий ухудшилось, что ведет к повторному заболачиванию и изменению состояния поверхности почвы. Поддержание работоспособности мелиоративных систем является одной из важнейших задач для эффективного использования осушенных земель. Цель работы – развитие теории взаимодействия ротационных рабочих органов с травяной растительностью и насосами, разработка технических средств для очистки мелиоративных каналов. Теоретические исследования и расчеты проводили на основе методов математического анализа, элементов классической механики. Проанализированы конструктивные особенности распространенной техники для очистки мелиоративных каналов и перспективные пути ее развития. Рассмотрены теоретические предпосылки для описания процессов резания сорной растительности и очистки мелиоративных каналов. На основании результатов исследований получена расчетная зависимость для определения силы резания, развиваемой ножами ротационного рабочего органа каналоочистителя, учитывающая высоту стеблестоя сорной растительности и расстояние от земли до оси вращения ротора. Результаты и выводы могут быть применены в качестве исходных данных для обоснования ротационных параметров ротационных рабочих органов мелиоративных машин.

Ключевые слова: мелиоративный канал, сила резания, ротационный рабочий орган, сопротивление резанию, угловая скорость, момент инерции, режущая кромка

A. N. Basareuski, K. A. Kravchenin

Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization, Minsk, Belarus

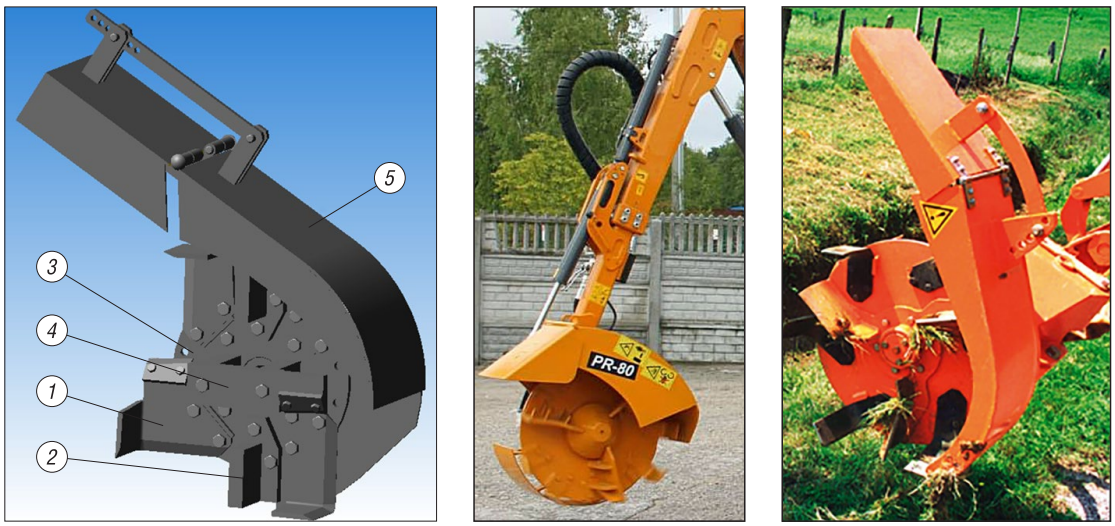
DETERMINATION OF CUTTING FORCE APPLIED BY BLADES OF ROTARY WORKING BODY OF DITCH CLEANER

Currently the world's drained land area makes over 210 million hectares. In the United States about 60 million hectares of land is drained, in Europe cultivated lands are 80–100% meliorated. In the Republic of Belarus the area of meliorated lands is about 2.9 million hectares, over the third part of crops are produced on these lands. However, at a long-time use the condition of drained lands has deteriorated, leading to rewetting and change of the soil surface condition. Maintaining melioration systems is one of the most important tasks for the efficient use of meliorated lands. The aim of research – development of theory of interaction of rotary working body with herbal plants and pumps, development of engineering tools for cleaning the melioration channels. Theoretical studies and calculations were carried out based on methods of mathematical analysis and elements of classical mechanics. The structural peculiarities of widely used equipment for cleaning melioration channels and perspective ways of its development are analyzed. Theoretical background for description of cutting processes for plants and cleaning the melioration channels are considered. Based on the research results, the calculated dependence for determining the cutting force applied by the blades of rotary working body of channel cleaner is obtained, taking into account the height of the plants stalks and the distance from the ground to the rotor rotation axis. The results and conclusions can be used as initial data for substantiation of rotary parameters of rotary working body of melioration machines.

Keywords: meliorative channel, cutting force, rotary working body, cutting resistance, angle speed, moment of inertia, cutting edge.

© Басаревский А. Н., Кравченин К. А., 2017

Одним из основных условий качественного функционирования современного сельскохозяйственного производства является надежная работа мелиоративной сети, состояние которой сегодня определяет технический уровень земледелия. В настоящее время площадь осушенных земель в мире превысила 210 млн га, из них 2/3 приходится на Европу и Северную Америку. Наибольшие площади осушения (около 60 млн га) находятся в США. В Великобритании, Нидерландах, Финляндии обрабатываемые земли мелиорированы на 80–100 %. Почти во всех развитых странах Европы болота и переувлажненные земли осушены практически полностью [1–4]. В этих странах очистка мелиоративных каналов, как правило, производится одноковшовыми экскаваторами со специализированными ковшами, изначально не предназначенными для выполнения таких операций. Одноковшовые каналоочистители часто нарушают профиль дна и откосов каналов, не способны очищать каналы малых размеров и требуют проведения дополнительных работ. Поэтому для очистки небольших каналов все чаще используются каналоочистители с ротационным рабочим органом (рис. 1). Востребованность такой техники обусловлена ее высокой производительностью и хорошей надежностью [5–8]. При работе ротационные рабочие органы (рис. 1, *b*, *c*) не разрушают поперечный профиль канала, аккуратно очищают дно канала от наносов и сорной растительности[1] [9–10].



a *b* *c*

Рис. 1. Ротационные рабочие органы каналоочистителей: ротационный рабочий орган традиционной формы (*a*); рабочие органы каналоочистителей Rolmex R50/80, Польша (*b*); Noremat Ditch Cleaner, Франция (*c*)

Fig. 1. Rotary working bodies of ditch cleaner: rotary working body of traditional form (*a*); ditch cleaner working body Rolmex R50/80, Poland (*b*); Noremat Ditch Cleaner, France (*c*)

В СССР уже имелся опыт создания каналоочистителей с ротационными рабочими органами (МР-7А, МР-14, МР-16 и др.) во время расцвета мелиорации на Полесье, однако на тот момент техническое несовершенство подобной техники препятствовало ее широкому распространению.

В Беларуси первым шагом в создании современной отечественной каналоочистительной техники с ротационным рабочим органом можно назвать каналоочиститель КОРО-2 (рис. 1, *a*), освоение производства которого планируется ОАО «Амкодор-КЭЗ» и ОАО «Мозырский машиностроительный завод». Отличие его конструкции от зарубежных аналогов заключается в смещении режущей кромки ножей от осевой линии, что позволяет снизить ударные нагрузки и очищать мелиоративные каналы, частично заполненные жидкостью.

Следует отметить, что в мировой прикладной науке можно проследить тенденцию к снижению ресурсопотребления и увеличению надежности передовых технических разработок.

[1] Рекомендации по уходу за каналами с применением многоцелевых каналоочистителей со сменными рабочими органами на базе колесных тракторов класса 1,4…2 / А. П. Лихацевич, В. Н. Кондратьев, В. Н. Титов, Н. Г. Райкевич, Т. Г. Свиридович, К. А. Грушанович, Н. Н. Прокопович. – Минск: Институт мелиорации и луговодства НАН Беларуси, 2004. – 35 с.

В Беларуси на государственном уровне этим вопросам также уделяется значительное внимание. Так, одним из ключевых направлений принятой государственной программы развития аграрного бизнеса в Республике Беларусь на 2016–2020 годы, подпрограмма 8 «Сохранение и использование мелиорированных земель», является повышение энергоэффективности каналоочистительной техники[2]. Для этого необходимо определить влияние конструктивных параметров ротационного рабочего органа на эффективность удаления сорной растительности, что позволит обосновать оптимальные параметры и усовершенствовать элементы конструкции ротационных рабочих органов каналоочистительных машин.

Как известно, на энергоемкость процесса резания оказывает влияние в первую очередь сила сопротивления резанию, но возможность среза растительности определяется другим параметром – силой резания. Срез растительности осуществим только в том случае, если сила резания, развиваемая рабочим органом с заданными конструктивными и технологическими параметрами, больше силы сопротивления резанию, возникающей в срезаемом материале в момент приложения к нему внешней силы.

Вопросу бесподпорного резания посвящены аналитические и экспериментальные исследования В. П. Горячкина, Е. М. Гутьяра, А. Ю. Ишлинского, Е. С. Босого, Н. Е. Резника, И. Ф. Василенко, В. И. Фомина, Д. МакРендал и др. [11–23].

Одной из первых серьезных работ, посвященных резанию растительности, является публикация В. А. Желиговского, который, развивая идеи В. П. Горячкина, теоретически и экспериментально исследовал процесс резания растительности со скольжением лезвия по ней. Однако он исследовал в лабораторных условиях только резание пакетов соломы при небольших скоростях.

При рассмотрении взаимодействия ножа и стебля при бесподпорном резании профессор Е. М. Гутьяр предположил, что деформация изгиба после удара ножа по стеблю перемещается вверх и вниз от места резания со скоростью распространения звука в материале, приводя к синусоидальному изгибу стебля [14].

В. И. Фомин отмечает, что увеличение скорости выше верхней критической нецелесообразно, так как это приводит к излишним затратам энергии. Указывается, что для острых ножей оптимальная скорость резания равна 60 м/с, затупленных − 80 м/с [25].

А. Ю. Ишлинский обосновывает критическую скорость резания при допущениях, что жесткость стебля по длине есть величина постоянная, а масса стебля сосредоточена на его конце. Им также получено уравнение для расчета критической скорости резания [26].

Экспериментальные данные указывают на то, что при определении критической скорости для бесподпорного резания следует ориентироваться не на массу отдельных свободно стоящих стеблей, а на их элементы, обладающие наименьшей массой и жесткостью, т. е. на листья, вегетативные побеги и т. п. Для различных тонкостебельных и травянистых культур критическая скорость колеблется от 8 до 16 м/с. Однако, для того чтобы обеспечить 100%-ное срезание стеблей травы любой жесткости, необходимо увеличивать скорость резания до 40 м/с [27].

Следует помнить, что вектор мгновенной скорости любой точки абсолютно твердого тела, вращающегося с угловой скоростью, равен произведению угловой скорости и радиуса от этой точки до оси ее вращения [28]. Линейная и угловая (для вращательного движения) скорость необходимы для вычисления ускорений тела и имеют прямо пропорциональное влияние на силу резания.

Д. МакРендал [19, 20], Ф. Каифаш [16] и М. И. Карпенко [5] составляли и анализировали графики зависимости мощности, приходящейся на метр ширины захвата, затрачиваемой на срезание, от скорости резания. Изучение графиков показывает, что результаты их исследований довольно противоречивы.

Из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что разные авторы нередко получают отличающиеся результаты, существующие теоретические выкладки не учитывают специфических условий, в которых работает каналоочиститель (например, высоту стеблестоя сорной растительности, расстояние от земли до оси вращения ротора, закочкаренности и заиленности ка-

[2] Государственная программа развития аграрного бизнеса в Республике Беларусь на 2016–2020 годы (внесение изменений в постановление Совета Министров Республики Беларусь от 16 июня 2014 г. № 585).

нала и т. д.), остается много пробелов в обосновании силы резания, развиваемой ротационными рабочими органами каналоочистителей.

Цель работы – исследование процесса резания сорной растительности и очистки мелиоративных каналов, обоснование параметров и режимов работы ротационных рабочих органов каналоочистительной техники.

Как правило, ротационный рабочий орган каналоочистителей состоит из следующих элементов (рис. 1, *а*): ножей *1*, отбрасывающих лопаток *2*, ротора *3*, фронтального ножа *4*, кожуха *5*, гидросистемы и башмака. Работает каналоочиститель с ротационным рабочим органом следующим образом. Приводной вал передает вращательный момент ротору, на котором установлены ножи и отбрасывающие лопатки. Ножи срезают сорную растительность и наносы, а отбрасывающие лопатки подхватывают их и отбрасывают через кожух на берму канала [2, 7].

Рассмотрим процесс удаления наносов, стеблей древесно-кустарниковой и сорной растительности ножами ротационного рабочего органа. Вращаясь вокруг оси приводного вала, закрепленные на роторе ножи действуют на срезаемый материал с какой-то силой, назовем ее $N_{рез}$. По третьему закону Ньютона, тело дейтвует на ножи ротационного рабочего органа с силой, равной по модулю силе $N_{рез}$ и противоположной по направлению, назовем ее $F_{рез}$ (т. е. $N_{рез} = |F_{рез}|$). Таким образом, можно сказать, что в отношении оси вращения ротационного рабочего органа приложен момент силы, плечом которого выступает расстояние от оси ротора до периферии вращения режущей кромки ножей R:

$$M = F_{рез} R, \tag{1}$$

где R – момент силы, Н · м; $F_{рез}$ – сила, с которой тело действует на нож в момент резания, кг · м/с^2; R – расстояние от оси ротора до периферии вращения режущей кромки ножей, м.

В то же время сумму моментов сил, действующих на тело, можно рассматривать как произведение момента инерции тела на его угловое ускорение :

$$M = I\varepsilon, \tag{2}$$

где I – момент инерции ротационного рабочего органа в точке приложения силы, кг · м^2; ε – угловое ускорение режущей кромки при вращении ротационного рабочего органа, рад/с^2.

Приравняем момент силы, действующий на срезаемую сорную растительность, и сумму моментов сил, действующих на ротационный рабочий орган, и выразим из полученного уравнения силу резания $F_{рез}$:

$$F_{рез} R = I\varepsilon, \tag{3}$$

$$F_{рез} = \frac{I\varepsilon}{R}, \tag{4}$$

По правилу аддитивности момент инерции тела приблизительно равен сумме моментов инерции составных частей вращающихся элементов ротационного рабочего органа[3]. Рабочую часть ротационного рабочего органа условно можно разделить на два составных элемента (рис. 2): боковые щеки ножей и диск с вертикальными участками ножей, который можно представить в виде квадрата со стороной a.

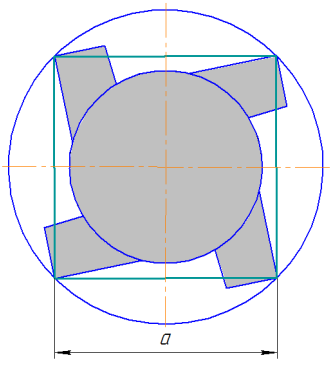


Рис. 2. Схема к определению момента инерции ротационного рабочего органа

Fig. 2. Scheme for determining the rotating working body inertia moment

Общий момент инерции ротационного рабочего органа равен

$$I = \frac{1}{6} m_1 a^2 + m_2 R^2, \tag{5}$$

где m_1 – масса ротора и вертикальных участков всех ножей, кг; m_2 – масса боковых щек с режущими кромками всех ножей, кг;

[3] Видеоархивы Ришельевского физико-математического лицея и Одесского национального университета им. И. И. Мечникова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rl.odessa.ua/index.php/ru/arkhiv – Дата доступа 1.10.2016.

a – длина стороны квадрата, образованного пересечением вспомогательных линий, соединяющих режущие кромки ножей ротационного рабочего органа (рис. 2), м.

Угловое ускорение ε режущей кромки ножей можно представить как отношение изменения угловой скорости к изменению времени [26]. В случае, если угловая скорость ω неизвестна, ее можно выразить через скорость изменения угла φ (см. рис. 3):

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t^2}, \tag{6}$$

где ω – угловая скорость вращения ротора, рад$^{-1}$; φ – угол, в диапазоне которого происходит срез сорной растительности, рад; *t* – время, за которое режущая кромка лезвия ножа при вращении ротора переместится на угол φ, с.

Предположим, что при полном обороте ротора сила $F_{рез}$ будет действовать со стороны срезаемой сорной растительности на режущую кромку лезвия ножа только на участке *l* (рис. 3), ограниченным углом φ у оси вращения ротора.

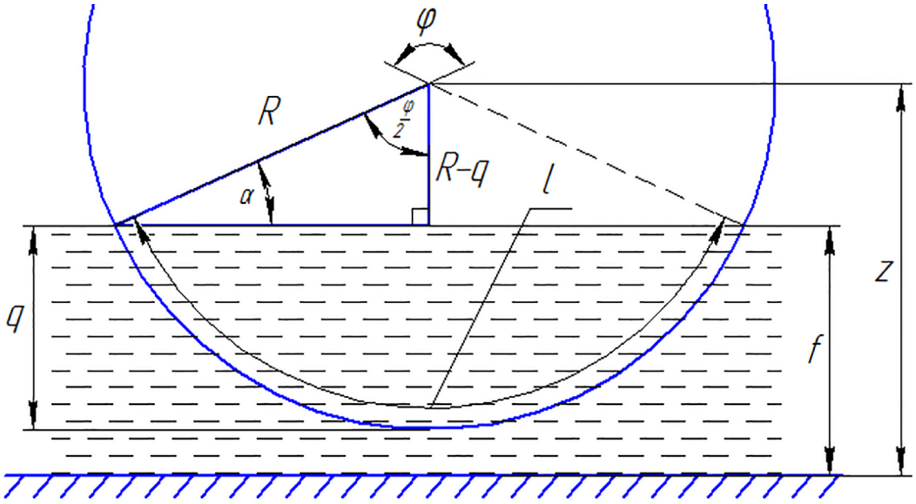


Рис. 3. Схема к определению длины дуги сегмента

Fig. 3. The scheme for determining the arc segment length

Длина дуги сегмента, ограниченного углом φ, для градусной меры угла выражается формулой

$$l = \frac{\pi R\varphi}{180°}. \tag{7}$$

Здесь *l* – длина дуги окружности, описываемой режущей кромкой ножей вращающегося ротора, где началом дуги является точка опускания режущей кромки ножей ниже высоты стеблей сорной растительности, а концом, наоборот, точка поднятия режущей кромки выше верхушек стеблей (длина дуги, ограниченная углом φ), м.

Время прохождения режущей кромкой расстояния можно представить как отношение длины пройденного пути к скорости:

$$\Delta t = \frac{l}{\vartheta} = \frac{\frac{\pi R\varphi}{180°}}{\omega R} = \frac{\frac{\pi R\varphi}{180°}}{\frac{\pi nR}{180°}} = \frac{\varphi}{n} \tag{8}$$

(*n* – частота вращений ротора, град/с).

Тогда угловое ускорение ε равно

$$\varepsilon = \frac{\omega}{\frac{\varphi}{n}} = \frac{\frac{\pi n^2}{180°}}{\varphi} = \frac{\pi n^2}{180°\varphi}. \tag{9}$$

Найдем угол φ из прямоугольного треугольника со сторонами R и $(R–q)$ (см. рис. 3):

$$\sin\alpha = \frac{R-q}{R}, \tag{10}$$

где q – расстояние от оси вращения ротора до уровня стеблестоя сорной растительности, м; α – угол между условной линией вершин стеблей (средняя высота) и опирающимся на нее радиусом ротора, град.

Из рис. 3 видно, что угол φ равен

$$\varphi = 2(90° - \alpha). \tag{11}$$

Подставим выражения (5) и (9) в формулу (4) и преобразуем ее:

$$F_{\text{рез}} = \frac{\left(\frac{1}{6}m_1a^2 + m_2R^2\right)\pi n^2}{180°\varphi R}. \tag{12}$$

Используя известные технические параметры ротационных рабочих органов (примем: m_1 = 30 кг; a = 0,42 м; m_2 = 7 кг; R = 0,3 м; n = 4800 град/с; φ = 2 · 80°), получим значение силы резания $F_{\text{рез}}$:

$$F_{\text{рез}} = \frac{\left(\frac{30}{6}\cdot 0,42^2 + 7\cdot 0,3^2\right)3,14\cdot 4800^2}{180°\cdot 2\cdot 80°\cdot 0,3} = 12\,643,73 \text{ Н}.$$

Для проверки полученного результата выразим силу резания через нормальное (центростремительное) ускорение и массу ножа с частью массы ротора. В дальнейших расчетах обозначим силу резания как $F'_{\text{рез}}$.

В общем случае сила резания, развиваемая ножами ротационного рабочего органа, совершающего равномерное вращательное движение, определяется зависимостью

$$F'_{\text{рез}} = a_n m, \tag{13}$$

где a_n – нормальное ускорение тела, направленное к оси вращения ротора, м/с^2; m – часть массы ротора с закрепленными на нем ножами, прикладываемая в момент среза, кг.

Преобразуем зависимость (13), подставив в нее значения выражения для определения нормального ускорения тела и части массы ротора с ножами. Учитывая то, что не вся масса рабочей части ротационного рабочего органа прикладывается в момент среза, введем поправочный коэффициент $\frac{1}{6}$, полученный исходя из количества рабочих элементов конструкции, установленных на вращающемся роторе (4 ножа и 2 отбрасывающие лопатки):

$$F'_{\text{рез}} = \omega^2 R\frac{1}{6}m_{\text{рот}} = \left(\frac{\pi n}{180°}\right)^2 R\frac{1}{6}m_{\text{рот}}. \tag{14}$$

Используя известные технические параметры ротационных рабочих органов (примем: R = 0,3 м; n = 4800 град/с; $m_{\text{рот}}$ = 7 кг), получим значение силы резания $F'_{\text{рез}}$:

$$F'_{\text{рез}} = \left(\frac{3,14\cdot 4800}{180°}\right)^2 0,3\frac{1}{6}37 = 12\,970 \text{ Н}.$$

Близость полученных результатов подтверждает правильность обеих формул (12), (14) для вычисления силы резания, развиваемой ножами ротационного рабочего органа.

Выбирая из двух предложенных формул, для вычисления силы резания через нормальное (центростремительное) ускорение и массу ножа с частью массы ротора и через приравнивание момента силы, действующей на срезаемую сорную растительность, и сумму моментов сил, действующих на ротационный рабочий орган, для более точных расчетов следует пользоваться последней, так как она учитывает больше переменных факторов: высоту стеблестоя сорной растительности, угол при оси вращения ротора, в диапазоне которого происходит срез сорной растительности, момент инерции тела и его угловое ускорение.

Заключение. В результате проведенных теоретических исследований получена расчетная зависимость для определения силы резания, развиваемой ножами ротационного рабочего органа каналоочистителя. Установлено, что сила резания не зависит от угла заточки лезвия, скоса режущей кромки ножа и угла вхождения режущей кромки в срезаемый материал. Эти параметры имеют прямо пропорциональное влияние только на силу сопротивления резанию. Также сила резания не зависит от горизонтального или вертикального смещения режущей кромки ножа от осевых линий ротора, при условии, что в обоих случаях радиус ротационного рабочего органа по периферии вращения режущих кромок будет одинаковым, так как при равном удалении режущей кромки от оси вращения ротора плечо силы будет одинаковым.

Проведенные теоретические исследования позволят развить теорию взаимодействия ротационного рабочего органа каналоочистителя с наносами и сорной растительностью, а также создать научные основы к разработке энергоэффективной каналоочистительной техники. Результаты и выводы данной статьи могут быть использованы в качестве исходных данных для обоснования рациональных параметров ротационных рабочих органов мелиоративных машин.

Список использованных источников

1. *Дмитриева, О. М.* Технологический комплекс машин для содержания осушительных каналов / О. М. Дмитриева // Гидротехника и мелиорация. − 1977. − № 4. − С. 51−53.

2. *Титов, В. Н.* Технические средства для окашивания берм и откосов каналов / В. Н. Титов, С. Е. Страхов // Мелиорация. – 2012. − № 2 (67). − С. 17−23.

3. *Кавешников, Н. Т.* Эксплуатация и ремонт гидротехнических сооружений / Н. Т. Кавешников. – М. : Агропромиздат, 1989. – 272 с.

4. *Корженевский, А. Н.* Опыт эксплуатации мелиоративных каналов в БССР / А. Н. Корженевский, Л. И. Новик // Гидротехника и мелиорация. – 1978. – № 11. – С. 63−67.

5. *Карпенко, А. Н.* Сельскохозяйственные машины / А. Н. Карпенко, В. М. Халанский. – 6 изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1989. – 527 с.

6. *Корженевский, А. Н.* Ремонтные работы на осушительных системах / А. Н. Корженевский. – М. : Колос, 1978. – 240 с.

7. Мелиоративные машины / Б. А. Васильев [и др.] ; под ред. И. И. Мера. – М. : Колос, 1980. – 351 с.

8. *Кореневич, Л. П.* Экспериментально-теоретическое исследование и обоснование параметров режущих аппаратов роторного типа : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Л. П. Кореневич. – Минск, 1971. – 149 л.

9. *Магомедов, Ф. М.* Оптимизация параметров режима технологического процесса скашивания растительности на оросительных каналах / Ф. М. Магомедов, Н. Г. Фаталиев, И. М. Меликов // Современные проблемы и перспективы развития аграрной науки : материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Махачкала, 26–27 апр. 2016 г. / Дагестан. гос. с.-х. акад. – Махачкала, 2010. – С. 263–270.

10. *Шаршунов, В. А.* Обоснование оптимальных параметров ножей роторной косилки / В. А. Шаршунов, С. Г. Рубец // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19–20 окт. 2010 г. : в 2 т. / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва ; редкол.: П. П. Казакевич, О. О. Дударев. – Минск, 2010. – Т. 2. – С. 51–58.

11. *Азаренко, В. В.* Моделирование процесса взаимодействия ножа фрезы с обрабатываемой средой / В. В. Азаренко // Математическое моделирование сельскохозяйственных объектов – основа проектирования технологий и машин XXI века : материалы междунар. науч. конф., Минск, 27–28 февр. 2001 г. / Белорус. науч.-исслед. ин-т механизации сел. хоз-ва ; редкол.: В. Н. Дашков [и др.]. – Минск, 2001. – С. 43–48.

12. *Шаршунов, В. А.* Экспериментальное исследование мощности, затрачиваемой на срезание древесно-кустарниковой растительности усовершенствованным ножом роторной косилки / В. А. Шаршунов, Е. И. Мажугин, С. Г. Рубец // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2011. – № 2. – С. 122–127.

13. *Комаров, Л. И.* К определению основных параметров измельчающего аппарата роторного типа / Л. И. Комаров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1963. – № 6. – С. 22−24.

14. Влияние типа режущего аппарата на качество скашивания растительности на каналах / А. А. Коршиков [и др.] // Агропромышленные машины и оборудование (теория, конструкция и расчет : сб. науч. тр. / Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. – Новочеркасск, 2008. – Вып. 8. – С. 4–8.

15. *Желиговский, В. А.* Экспериментальная теория резания лезвием / В. А. Желиговский // Тр. Моск. ин-та механизации и электрификации сел. хоз-ва. – Вып. 9 – М. : Изд. Моск. ин-та механизации и электрификации сел. хоз-ва, 1940. – 27 с.

16. *Каифаш, Ф.* Обоснование динамических параметров и режима работы ротационного режущего аппарата : дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Ф. Каифаш. – М., 1982. − 158 л.

17. *Константинов, В. А.* Определение критической скорости резания свободного стебля / В. А. Константинов // Тракторы и сельхозмашины. – 1964. – № 12. − С. 20−22.

18. *Кондратьев, В. Н.* Косилки бильного типа: вопросы проектирования и эксплуатации : пособие / В. Н. Кондратьев. – Минск : БелНИИ мелиорации и луговодства, 2002. – 40 с.

19. *McRandal, D. M.* Impact cutting behavior of forage crops. I. Mathematical models and laboratory test / D. M. McRandal, P. B. McNulty // J. of Agr. Engineering Research. – 1978. – Vol. 23, N 3. – P. 313–328.

20. *McRandal, D.M.* Mechanical and physical properties of grasses / D.M. McRandal, P.B. McNulty // Transactions of the ASAE. – 1980. – Vol. 23, N 4. – P. 816–821.

21. *Johnson, C.E.* Horizontal rotary mower blade dynamics / C.E. Jonson, W.D. Robinson, J.L. Turner // Transactions of the ASAE. – 1984. – Vol. 27, N 6. – P. 1666–1668.

22. *Мартынов, В.М.* Геометрия ножа ротационного режущего аппарата / В.М. Мартынов // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 3. − С. 34−36.

23. *Коковин, Е.В.* Механизация работ по осушению и освоению земель / Е.В. Коковин, М.Ф. Незнаев. – М. : Сельхозгиз, 1956. – 391 с.

24. *Рубец, С.Г.* Скашивание древесно-кустарниковой растительности на мелиоративных объектах многороторной косилкой с трапециевидными ножами : дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / С.Г. Рубец. – Минск, 2013. − 196 л.

25. *Резник, Н.Е.* Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н.Е. Резник. – М. : Машиностроение, 1975. − 311 с.

26. *Фомин, В.И.* Исследование процесса бесподпорного среза трав / В.И. Фомин // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та с.-х. машиностроения. – М., 1962. – Вып. 39 : Исследование новых технологических процессов и рабочих органов сеноуборочных машин. – С. 3–56.

27. *Титов, В.Н.* Технологический регламент на окашивание каналов мелиоративных систем / В.Н. Титов, К.А. Гуцанович // Мелиорация. – 2012. − № 1 (67). − С. 203−210.

28. *Штомпель, Б.Н.* Исследование технологического процесса кошения трав ротационными косилками / Б.Н. Штомпель. – Минск : Изд-во Акад. с.-х. наук БССР, 1961. – 35 с.

References

1. Dmitrieva O.M. *Tekhnologicheskiy kompleks mashin dlya soderzhaniya osushitel'nykh kanalov* [Technological machinery complex for maintenance of drainage channels]. *Gidrotekhnika i melioratsiya* [Hydraulic Engineering and Land Reclamation], 1977, no. 4, pp. 51−53. (In Russian).

2. Titov V.N., Strakhov S.E. *Tekhnicheskie sredstva dlya okashivaniya berm i otkosov kanalov* [Technical means for coloring of berms and slopes of channels]. *Melioratsiya* [Land Reclamation], 2012, no. 2 (67), pp. 17−23. (In Russian).

3. Kaveshnikov N.T. *Ekspluatatsiya i remont gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Maintenance and repair of hydraulic structures]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989. 272 p. (In Russian).

4. Korzhenevskiy A.N., Novik L.I. *Opyt ekspluatatsii meliorativnykh kanalov v BSSR* [Experience in maintenance of drainage canals in the Belorussian SSR]. *Gidrotekhnika i melioratsiya* [Hydraulic Engineering and Land Reclamation], 1978, no. 11, pp. 63−67. (In Russian).

5. Karpenko A.N., Khalanskiy V.M. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny. 6 izd.* [Agricultural machinery. 6 the ed.]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989. 527 p. (In Russian).

6. Korzhenevskiy A.N. *Remontnye raboty na osushitel'nykh sistemakh* [Repair works on drainage systems]. Moscow, Kolos Publ., 1978. 240 p. (In Russian).

7. Vasil'ev B.A., Gantman V.B., Komissarov V.V., Mer I.I., Pavlinov A.N., Revin B.G., Surikov V.V., Mer I.I. (ed.) *Meliorativnye mashiny* [Drainage machines]. Moscow, Kolos Publ., 1980. 351 p. (In Russian).

8. Korenevich L.P. *Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie i obosnovanie parametrov rezhushchikh apparatov rotornogo tipa. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Experimental and theoretical research and substantiation of the parameters of rotary cutting devices. Dr of tehn. sci. diss.]. Minsk, 1971. 149 p. (In Russian).

9. Magomedov F.M., Fataliev N.G., Melikov I.M. *Optimizatsiya parametrov rezhima tekhnologicheskogo protsessa skashivaniya rastitel'nosti na orositel'nykh kanalakh* [Optimization of the parameters of the mode of technological process of vegetation mowing on drainage canals]. *Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya agrarnoy nauki: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 26–27 aprelya 2016 g., g. Makhachkala* [Modern problems and prospects of the development of agrarian science: proceedings of the International scientific-practical conference, 26–27 April 2016, Makhachkala]. Makhachkala, 2010, pp. 263–270. (In Russian).

10. Sharshunov V.A., Rubets S.G. *Obosnovanie optimal'nykh parametrov nozhey rotornoy kosilki* [Substantiation of optimal parameters of rotary mower blades]. *Nauchno-tekhnicheskiy progress v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Minsk, 19–20 oktyabrya 2010 g.* [Scientific and technical progress in agriculture: proceedings of the International scientific-practical conference, Minsk, 19–20 October 2010]. Minsk, 2010, vol. 2, pp. 51–58. (In Russian).

11. Azarenko V.V. *Modelirovanie protsessa vzaimodeystviya nozha frezy s obrabatyvaemoy sredoy* [Modeling of the interaction of blade milling cutter with the work environment]. *Matematicheskoe modelirovanie sel'skokhozyaystvennykh ob"ektov – osnova proektirovaniya tekhnologiy i mashin XXI veka: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Minsk, 27–28 fevralya 2001 g.* [Mathematical modeling of agricultural objects – basis for the design of technologies and machines of the XXI century: proceedings of the International scientific conference, Minsk, 27–28 February, 2001]. Minsk, 2001, pp. 43–48. (In Russian).

12. Sharshunov V.A., Mazhugin E.I., Rubets S.G. *Eksperimental'noe issledovanie moshchnosti, zatrachivaemoy na srezanie drevesno-kustarnikovoy rastitel'nosti usovershenstvovannym nozhom rotornoy kosilki* [Experimental research on power needed for cutting tree-like shrubs by improved knives of rotor mower]. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy], 2011, no. 2, pp. 122–127. (In Russian).

13. Komarov L.I. *K opredeleniyu osnovnykh parametrov izmel'chayushchego apparata rotornogo tipa* [Determination of the basic parameters of rotary grinding machines]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva* [Mechanization and Electrification of Agriculture], 1963, no. 6, pp. 22−24. (In Russian).

14. Korshikov A.A., Fataliev N.G., Magomedov F.M., Kakhrimanov Z.N. *Vliyanie tipa rezhushchego apparata na kachestvo skashivaniya rastitel'nosti na kanalakh* [Influence of the type of cutting device on the quality of vegetation cutting on channels]. *Agropromyshlennye mashiny i oborudovanie (teoriya, konstruktsiya i raschet): sbornik nauchnykh trudov* [Agro-Industrial machinery and equipment (theory, design and calculation): collection of scientific works]. Novocherkassk, 2008, no. 8, pp. 4–8.

15. Zheligovskiy V.A. *Eksperimental'naya teoriya rezaniya lezviem* [Experimental cutting edge theory]. Moscow, Publication of Moscow Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, 1940. 27 p. (In Russian).

16. Kaifash F. *Obosnovanie dinamicheskikh parametrov i rezhima raboty rotatsionnogo rezhushchego apparata. Diss. kand. tekhn. nauk* [Substantiation of dynamic parameters and modes of operation of rotary cutting device. Dr. of techn. sci. diss.]. Moscow, 1982. 158 p. (In Russian).

17. Konstantinov V.A. *Opredelenie kriticheskoy skorosti rezaniya svobodnogo steblya* [Determination of critical cutting speed of free stem]. *Traktory i sel'khozmashiny* [Tractors and Farm Machinery], 1964, no. 12, pp. 20−22. (In Russian).

18. Kondrat'ev V.N. *Kosilki bil'nogo tipa: voprosy proektirovaniya i ekspluatatsii* [Slashing mowers: design and operation issues]. Minsk, Belarusian Research Institute of Land Reclamation and Grassland, 2002. 40 p. (In Russian).

19. McRandal D.M., McNulty P.B. Impact cutting behavior of forage crops. I. Mathematical models and laboratory test. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1978, vol. 23, no. 3, pp. 313–328. doi: 10.1016/0021-8634(78)90104-X.

20. McRandal D.M. Mechanical and physical properties of grasses. *Transactions of the ASAE*, 1980, vol. 23, no. 4, pp. 816–821. doi: 10.13031/2013.34669.

21. Johnson C.E., Robinson W.D., Turner J.L. Horizontal rotary mower blade dynamics. *Transactions of the ASAE*, 1984, vol. 27, no. 6, pp. 1666–1668. doi: 10.13031/2013.33024.

22. Martynov V.M. *Geometriya nozha rotatsionnogo rezhushchego apparata* [Geometry of blade of rotary cutting device]. *Traktory i sel'khozmashiny* [Tractors and Farm Machinery], 2009, no. 3, pp. 34−36. (In Russian).

23. Kokovin E.V., Neznaev M.F. *Mekhanizatsiya rabot po osusheniyu i osvoeniyu zemel'* [Mechanization of works on drainage and land reclamation]. Moscow, Sel'khozgiz Publ., 1956. 391 p. (In Russian).

24. Rubets S.G. *Skashivanie drevesno-kustarnikovoy rastitel'nosti na meliorativnykh ob"ektakh mnogorotornoy kosilkoy s trapetsievidnymi nozhami*. *Diss. kand. tekhn. nauk* [Cutting tree-like shrubs on reclamation facilities with a multi-rotor mower with trapezoidal blades. Dr. of tehn. sci. diss.]. Minsk, 2013. 196 p. (In Russian).

25. Reznik N.E. *Teoriya rezaniya lezviem i osnovy rascheta rezhushchikh apparatov* [Cutting edge theory and basis for calculation of cutting devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 311 p. (In Russian).

26. Fomin V.I. *Issledovanie protsessa bespodpornogo sreza trav* [Research on non-supporting grass cutting]. *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya* [Proceedings of the All-Union Scientific Research Institute of Agricultural Engineering]. Moscow, 1962, no. 39, pp. 3–56. (In Russian).

27. Titov V.N., Gutsanovich K.A. *Tekhnologicheskiy reglament na okashivanie kanalov meliorativnykh sistem* [Production schedules for mowing of channels of drainage systems]. *Melioratsiya* [Land Reclamation], 2012, no. 1 (67), pp. 203−210. (In Russian).

28. Shtompel' B.N. *Issledovanie tekhnologicheskogo protsessa kosheniya trav rotatsionnymi kosilkami* [Research on the technological process of cutting grass with rotary mowers]. Minsk, Publishing House of the Academy of Agricultural Sciences BSSR, 1961. 35 p. (In Russian).

Информация об авторах

Басаревский Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией механизации культуртехнических работ. Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства (Кнорина, 1, 220049 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: labmkr@yandex.ru.

Кравченин Константин Андреевич – соискатель, младший научный сотрудник. Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства (Кнорина, 1, 220049 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: john-kostigan@yandex.ru.

Information about the author

Basareuski Alexander N. – Ph. D. (Engendering), Assistant Professor, the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Agriculture Mechanization (1 Knorin Str., Minsk 220049, Republic of Belarus). E-mail: labmkr@yandex.ru.

Kravchenin Kanstantin A. – Postgraduate student, the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus (1 Knorin Str., Minsk 220049, Republic of Belarus). E-mail: john-kostigan@yandex.ru.

Для цитирования

Басаревский, А.Н. Определение силы резания, развиваемой ножами ротационного рабочего органа каналоочистителя / А.Н. Басаревский, К.А. Кравченин // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2017. – №1. – С. 90–98.

For citation

Basareuski A.N., Kravchenin K.A. Determination of cutting force applied by blades of rotary working body of ditch cleaner. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, agrarian series,* 2017, no 1, pp. 90–98.