

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\lambda}{dt} &= r\psi^2 + \frac{2\rho\psi - \rho_{ж}}{2\rho\psi + \rho_{ж}} \frac{V_{\phi}^2}{r} - \frac{12c\rho_{ж}^{a-1}\mu^{2-a}d_{ц}^a}{\pi d_{ц}^3(2\rho\psi + \rho_{ж})} \times \\ &\times \left[ \sqrt{(\lambda - V_r - V_{B.П.})^2 + (r\psi - V_{\phi})^2 + (\gamma - V_z)^2} \right]^{a-1} (\lambda - V_r - V_{B.П.}) \quad ; \\ \frac{d\psi}{dt} &= -\frac{1}{r} \left\{ \frac{12c\rho_{ж}^{a-1}\mu^{2-a}d_{ц}^a}{\pi d_{ц}^3(2\rho\psi + \rho_{ж})} \left[ \sqrt{(\lambda - V_r - V_{B.П.})^2 + (r\psi - V_{\phi})^2 + (\gamma - V_z)^2} \right]^{a-1} \times \right. \\ &\times (r\phi - V_{\phi}) + 2\lambda\psi \left. \right\} \quad ; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= -\frac{12c\rho_{ж}^{a-1}\mu^{2-a}d_{ц}^a}{\pi d_{ц}^3(2\rho\psi + \rho_{ж})} \left[ \sqrt{(\lambda - V_r - V_{B.П.})^2 + (r\psi - V_{\phi})^2 + (\gamma - V_z)^2} \right]^{a-1} (\gamma - V_z) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

на участке  $0,8 r_{cl} \leq r \leq D/2$

$$V_{\phi} = \frac{Q(0,5D)^n}{957,45\pi d_{СЛ}^{0,5} d_{ПИТ}^{1,5} r^n} \quad ; \quad (9)$$

на участке  $0,6 r_{cl} \leq r < 0,8 r_{cl}$

$$V_{\phi} = \frac{Q(0,5D)^n r}{957,45(0,4)^{n+1} \pi d_{ПИТ}^{1,5} d_{СЛ}^{n+1,5}} \quad ; \quad (10)$$

$$V_z = \frac{Q}{3000\pi d_{ПИТ}^2} \left[ 1 - 0,8\sqrt[3]{\left(\frac{0,5D}{r}\right)^2} \right] \quad ; \quad (11)$$

$$V_{B.П.} = 0,1\sqrt{\frac{g l c_{ПИТ}(\rho_T - \rho_{ж})}{500\rho_T\rho_{ж}}} \quad . \quad (12)$$

В формулах (8)...(12):

$V_r, V_{\phi}, V_z$  – м/с;  $Q$  – производительность микроциклона по питанию, м<sup>3</sup>/ч;  $D, H_{ц}$  – диаметр и высота цилиндрической части, м;  $d_{пит}, d_{сл}, d_{шл}$  – диаметры питающего, сливного и шламового отверстий соответствующих патрубков, м;  $h_{cl}$  – высота заглибления сливного патрубка, м;  $\alpha$  – угол конусности конической части микроциклона, град;

$n = \frac{0,4d_{ПИТ}^2}{d_{СЛ}^2} + 0,2$  – показатель степени;  $g$  – ускорение

свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $l$  – длина пути перемешивания с основным потоком некоторого объема жидкости, движущейся в поперечном потоку направлении:  $l=1$  м;  $c_{пит}$  – концентрация взвешенных частиц в питании микроциклона, мг/л.

Решение системы уравнений (7) позволит определить координаты точек пространственной траектории движения частицы, а также время и составляющие скорости её выделения из вращающегося потока жидкости. Значения  $V_r, V_{\phi}, V_z$  и  $V_{в.п.}$  учитываются в процессе интегрирования системы уравнений (7). Наиболее распространенными методами численного интегрирования являются методы Эйлера, Адамса и Рунге-Кутты.

Учитывая, что основным недостатком метода Эйлера является невысокая точность, а метод Адамса требует знания приближенного решения в нескольких начальных точках сетки и не допускает изменения шага в процессе счёта, наиболее удобным для решения системы дифференциальных уравнений (7) является метод Рунге-Кутты четвёртого порядка точности. При использовании данного метода в качестве приращения следует использовать промежуток времени  $\Delta t$ , в течении которого частица из положения с координатами  $r_n, \phi_n, z_n$  перемещается в положение с координатами  $r_{n+1}, \phi_{n+1}, z_{n+1}$ . Так как скорость потока жидкости на интервале  $\Delta t$  предполагается постоянной, значения её составляющих  $V_r, V_{\phi}$  и  $V_z$  принимаются для точки с координатами  $r_n, \phi_n, z_n$ .

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кислов Н.В., Санюкевич Ф.М. Гидроциклонное осветление воды / Под ред. М.А. Гатиха. – Мн.: Наука і тэхніка, 1990. – 128 с.
2. Поваров А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. – М.: Недра, 1978. – 232 с.

УДК 621.83.06

Лустенков М.Е.

## РУЧНАЯ ЛЕБЕДКА И МОТОР-РЕДУКТОР С ПЛАНЕТАРНОЙ ШАРИКОВОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

Комплекс вопросов, связанных с разработкой новых видов механизмов и машин с низким энергопотреблением, снижение их массогабаритных показателей, улучшение технических характеристик при одновременном снижении себестоимости изготовления и соответственно снижении цены готово-

го изделия, является несомненно актуальным, стоящим перед разработчиками новой техники.

Эллипсная шариковая передача (ЭШП), разработанная в Белорусско-Российском университете [1], состоит из нескольких цилиндрических деталей, расположенных коаксиль-

*Лустенков Михаил Евгеньевич, к.т.н., доцент каф. «Основы проектирования машин», начальник сектора по работе с иностранными студентами Белорусско-Российского университета. Беларусь, Б-РУ, 212005, г. Могилев, пр. Мира, 43.*

но: двух кулачков (внутреннего и наружного) и вала с пазами, параллельными оси передачи. Внутренний кулачок образован двумя торцовыми кулачками (скошенными под определенным углом цилиндрическими втулками), закрепленными на валу и обращенными друг к другу рабочими поверхностями. Профиль рабочей поверхности наружного кулачка является периодическим. Нагрузка в зацеплении передается телами качения. Для создания редуцирующего узла планетарного типа одна из деталей секции (внутренний кулачок, наружный кулачок, вал с пазами) делается ведущим звеном, другая – остановленным звеном (стойкой), тогда третья деталь становится ведомым звеном, и редуктор способен передавать нагрузку. В процессе работы тела качения под действием наложенных связей перемещаются одновременно по беговой дорожке внутреннего кулачка, по рабочей поверхности наружного кулачка и вдоль пазов вала с пазами. Основные детали многопериодной ЭШП показаны на рис.1.

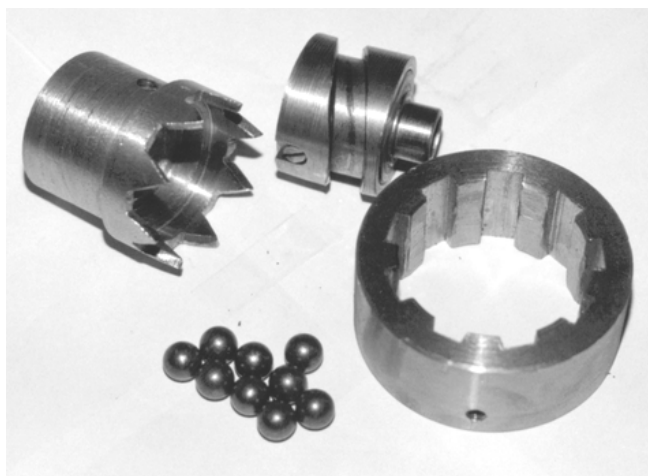


Рис. 1. Основные детали многопериодной ЭШП.

Модель *однопериодной* передачи при рассмотрении рабочих поверхностей деталей в виде линий, а шариков в виде материальных точек, представляет собой пересечение в пространстве двух эллипсов (отсюда и название передачи) [2]. Сами эллипсы образованы сечением одного цилиндра, с радиусом  $R$  образующей окружности, двумя плоскостями под различными (или одинаковыми) углами к его оси. Средние линии этих эллипсов совпадают, то есть две секущие плоскости проходят через одну точку на оси цилиндра. При этом развертки рабочих поверхностей (эллипсов) на плоскость представляют собой однопериодные синусоиды. Основные недостатки однопериодных ЭШП: вероятность заклинивания при наложении эллипсов друг на друга и попадании тел качения на большие полуоси эллипсов (самоторможение), передаточное отношение равно двум или единице (в зависимости от кинематической схемы), а также невысокая нагрузочная способность одной редукторной секции, обусловленная наличием только двух шариков в зацеплении. Для создания скоростных и силовых передач один из кулачков ЭШП необходимо делать многопериодным. Поэтому профиль наружного кулачка в модели многопериодной ЭШП можно представить как периодическую линию (синусоиду, косинусоиду) замкнутую на цилиндре, которая взаимодействует с эллипсом.

Принцип работы передач подобного типа носит планетарный характер, так как кинематические зависимости у ЭШП аналогичны таким же зависимостям планетарных зубчатых передач и определяются формулой Виллиса. Если рассмотреть широко распространенную схему 2К-Н, то число периодов наружного кулачка  $Z_3$  соответствует числу зубьев центрального колеса  $b$ , а число периодов на внутреннем кулачке  $Z_1$  соответствует числу зубьев центрального колеса  $a$ . Так как

эллипс в пространстве это однопериодная синусоида на плоской развертке, то  $Z_1=1$ , что предполагает реализацию больших передаточных отношений в одной ступени. Сателлитами являются тела качения (шарики), а водилом – вал с пазами. На базе одной секции передачи возможна работа редуктора (мультипликатора) по шести кинематическим схемам, также возможна работа передачи в режиме дифференциала.

ЭШП компактны, имеют сравнительно небольшие габариты в радиальном направлении, так как их передаточное отношение в отличие от зубчатых передач не зависит непосредственно от диаметральных размеров деталей передачи. Кроме этого все детали передачи изготавливаются на универсальном металлорежущем оборудовании стандартным инструментом. Нами разработана технология изготовления адаптированного профиля многопериодного кулачка [3]. Шарики для редукторов можно извлекать из шарикоподшипников либо заказывать на подшипниковых заводах в виде свободных тел качения.

Среди зарубежных фирм, занимающихся исследованием и производством передач схожего типа следует выделить ЗАО «Томские трансмиссионные системы», НТО «Приборсервис» совместно с Сибирской машиностроительной компанией (Россия), «Synkinetics Inc.», «АЕС 81», «Computer Drive Corporation» (США), «Bollman Hydraulik GmbH» (Германия), «Axial Wave Drive» (Нидерланды), «Twinspin» (Словакия), «Precision Mechanical Devices» (Великобритания) и других. По данному направлению на постсоветском пространстве созданы научные школы в Российской Федерации, Украине, Молдове.

Рассмотрим вопросы, связанные с практической реализацией передач этого типа. В Белорусско-Российском университете на кафедре «Основы проектирования машин» разработаны опытные образцы механизмов и средств малой механизации со встроенными ЭШП [4]. Создан и используется в производстве планетарный ключ для демонтажа ведущих колес грузовых автомобилей ЗИЛ и ГАЗ, поршневой насос. В настоящее время разработаны ручная лебедка и мотор-редуктор.

Подъемно-тяговые механизмы широко используются в различных отраслях народного хозяйства. В частности, такие устройства как лебедки применяются не только в производстве, но и для личных нужд населения при строительстве, в гараже и т. д. На сегодняшний день существует множество конструкций лебедок. Целью настоящей работы является создание малогабаритной лебедки со встроенным редуцирующим узлом. Компактные ручные лебедки грузоподъемностью от 400 до 1000 кг чаще всего бывают двух типов: с рычажным и червячным механизмом. Большинство лебедок произведенных в Республике Беларусь и Российской Федерации развивает усилие до 500 кг и этого оказывается достаточно, чтобы привести в движение забуксовавший легковой автомобиль. Нами в качестве зацепления предлагается эллипсное шариковое зацепление, которое позволяет создавать планетарные редукторы. Преимущества лебедки на базе ЭШП:

1. Малые массогабаритные показатели. Диаметр корпуса лебедки 110 мм, ее масса - 7,8 кг.
2. Высокая технологичность изготовления деталей, отсутствие в конструкции дорогостоящих материалов, и, следовательно, низкая себестоимость.
3. Наличие самоторможения в передаче, легкость сборки-разборки.

Конструкция редуцирующего узла лебедки приведена на рис.2. Ведущий вал, представляет собой два кулачка, закрепленных на цилиндрическом валу-основании, соединенном с рукояткой. При вращении рукоятки тела качения перемещаются также по многопериодной торцевой поверхности неподвижного кулачка связанного с неподвижным корпусом (на рис.2 корпус не показан). Вследствие наложенных связей тела качения вынуждают вал с пазами вращаться с редуктором. При

этом вращается барабан, связанный с валом шлицевыми соединениями и производится наматывание (разматывание) троса.

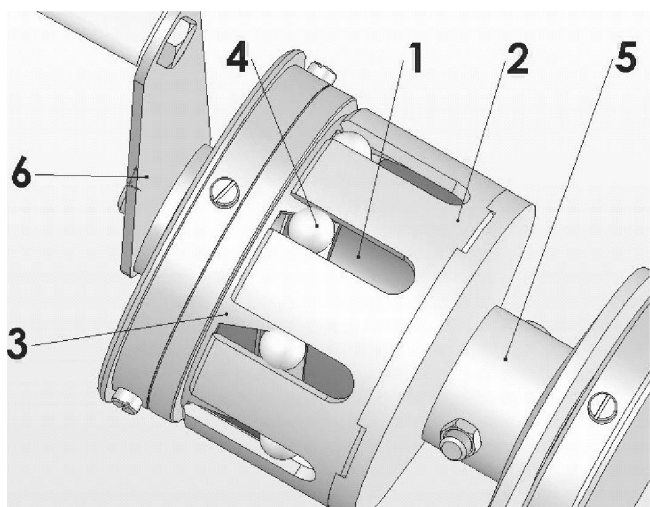


Рис. 2. Конструкция редуцирующего узла лебедки. 1 – внутренний кулачок; 2 – вал с пазами; 3 – наружный кулачок; 4 – тела качения; 5 – барабан; 6 – рукоятка.

Расчетный вес подымаемого груза  $P_{\Gamma}$  (в кг) определится согласно формуле:

$$P_{\Gamma} = \frac{P_p l_p u \eta}{r_{\delta} g}, \quad (1)$$

где  $P_p$  - усилие на рукоятке, Н;  $l_p$  - длина рукоятки, мм;  $u$  - передаточное отношение;  $\eta$  - КПД редуцирующего узла;  $r_{\delta}$  - радиус барабана лебедки, мм;  $g=9,8$  - коэффициент перевода единиц измерения (ньютон в килограммы).

КПД зацепления определяется по формуле:

$$\eta_{12}^{(3)} = \frac{\sin(\alpha_1 + \alpha_3) \cos \phi}{u \sin(\alpha_1 + \phi) \cos(\alpha_3 - 2\phi)}, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_3$  - углы подъема периодических кривых внутреннего и наружного кулачков соответственно;  $\phi$  - угол трения, который находится в известной зависимости от коэффициента трения  $f$ :  $\phi = \arctg(f)$ .

Характерной особенностью ЭШП является то, что при равенстве амплитуд двух сопрягаемых кривых, передаточное отношение остается постоянным за цикл зацепления и не зависит от углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_3$ . При прохождении шарика по рабочей поверхности любого кулачка, угол подъема периодически изменяется от нуля до некоторого максимального значения, и вновь до нуля. При однопериодном исполнении обоих кулачков ЭШП, зависимость мгновенного КПД передачи будет носить такой же характер. Для многопериодных ЭШП коэффициент перекрытия передачи отличен от единицы, нагрузку одновременно передают несколько тел качения и для определения среднего значения КПД ЭШП целесообразно использовать усредненное значение угла наклона кривых  $\alpha_{icp}$ .

$$\alpha_{icp} = \arctg\left(\frac{2AZ_i}{\pi R}\right), \quad (3)$$

где  $A$  - амплитуда кривых;  $R$  - радиус окружности, образующей цилиндрическую поверхность;  $Z_i$  - число периодов; индекс  $i=1$  (3) характеризует принадлежность подставляемо-

го параметра внутреннему либо наружному кулачку соответственно.

При условии  $P_p=80$ Н,  $l_p=200$ мм;  $r_{\delta}=20$ мм;  $u=9$ , получим  $P_{\Gamma}=367$ кг.

Скорость подъема груза  $v_{\Gamma}$  зависит от скорости вращения входного вала  $n_{вх}$ . Для лебедки с электрическим приводом имеем зависимость:

$$v_{\Gamma} = \frac{n_{вх} r_{\delta}}{u}. \quad (4)$$

Для лебедки с ручным приводом целесообразнее оперировать величиной перемещения груза  $x_{\Gamma}$  за один оборот рукоятки лебедки:

$$x_{\Gamma} = \frac{2\pi}{u} r_{\delta} \quad (5)$$

Для рассчитанной и изготовленной лебедки  $x_{\Gamma}=20$  см. При рассмотрении барабана как выходного вала, передающего движение на рукоятку лебедки КПД определится:

$$\eta_{21}^{(3)} = \frac{\sin(\alpha_1 - \phi) \cos(\alpha_3 + 2\phi)}{u \cos \phi \sin(\alpha_1 + \alpha_3)}. \quad (6)$$

Проанализируем изменение КПД передачи при двух возможных кинематических схемах передачи мощности. Очевидно, что при увеличении коэффициента трения потери в зацеплении возрастают, а КПД соответственно уменьшается. Однако при третьей кинематической схеме (предполагается передача движения от барабана на рукоятку) это уменьшение происходит более интенсивно, нежели при первой кинематической схеме (рис. 3). Это свидетельствует о наличии самоторможения в механизме, что для грузоподъемных механизмов является преимуществом.

Ручная лебедка была изготовлена и испытана. Практическая апробация подтвердила расчеты и доказала работоспособность этой конструкции. Общий вид изготовленной лебедки приведен на рис. 4.

В конструкции лебедки предусмотрена возможность ускоренной намотки-размотки троса: при отворачивании стопорного винта фиксация наружного кулачка в корпусе прекращается и барабан поворачивается на угол  $360^{\circ}$  за один оборот рукоятки. Разработанные методики расчета деталей передачи по контактным напряжениям и напряжениям изгиба и установленные запасы прочности деталей ЭШП свидетельствуют о том, что надежность лебедки во многом определяется прочностью троса. Согласно ГОСТ 3068-88 у троса толщины 4,5 мм разрыв возможен при усилии 1125 кгс.

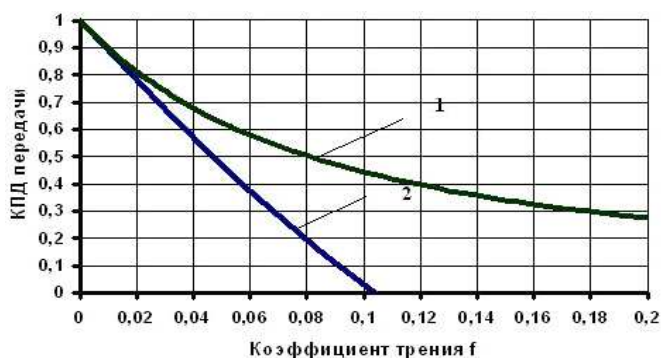


Рис. 3. Изменение КПД передачи от коэффициента трения для первой (1) и третьей (2) кинематических схем ЭШП.



Рис. 4. Ручная лебедка. Общий вид.

Применение разрабатываемых нами планетарных передач с телами качения не ограничено созданием только низкоскоростных редуцирующих устройств (гайковвертов, высокомоментных ключей, лебедок). В данной работе также была оценена возможность применения планетарного зацепления с телами качения для создания высокоскоростной передачи.

Конструкция мотор-редуктора, разработана на базе двухступенчатой планетарной шариковой передачи. Ступени соединены последовательно. Первая ступень спроектирована по третьей (обращенной) кинематической схеме: вал с пазами остановлен и связан с корпусом, выходным звеном является наружный кулачок. Наружный кулачок с многопериодным профилем изготовлен на валу, где размещены также два кулачка, образующие беговую дорожку внутреннего кулачка второй ступени: таким образом, этот вал является выходным для первой ступени и входным для второй ступени. Вторая ступень сконструирована по первой кинематической схеме, выходной звено – вал с пазами, остановленное звено – наружный кулачок. Общее передаточное отношение мотор-редуктора определяется по следующей формуле:

$$u = \left( -\frac{z'_3}{z'_1} \right) \left( 1 + \frac{z''_3}{z''_1} \right) = -z'_3 (1 + z''_3) \quad (7)$$

Верхние индексы в формуле (7) обозначают номер ступени редуктора.

УДК 621.793

Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Хилько Д.Н.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ФЕРРОПОРОШКА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ

Известно [1], что сила разрядного тока при электромагнитной наплавке определяется величиной электрической проводимости порошка в рабочей зоне. Электрическая проводимость ферропорошка, в свою очередь, обусловлена наличием токопроводящих цепочек-микроэлектродов, формирующихся

Мотор-редуктор был разработан в Белорусско-Российском университете, изготовлен и собран, на рис.5 приведен его общий вид с блоком управления и заземляющим проводом.

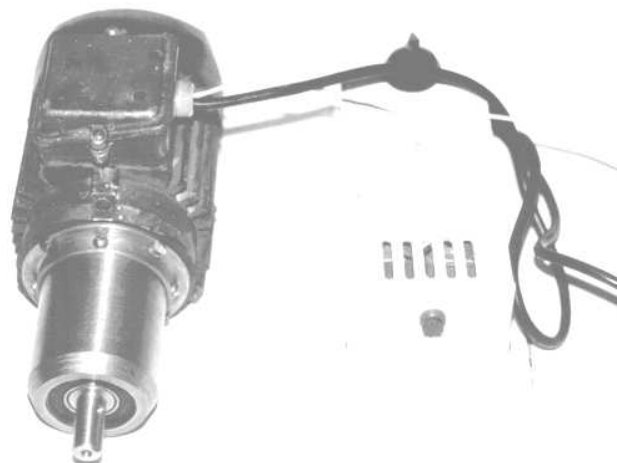


Рис. 5. Мотор-редуктор с блоком управления.

Блок управления служит для реверса вращения. В конструкции используется асинхронный электродвигатель типа 4AA5682У3 мощностью 250 Вт и частотой вращения 2760 об/мин. Электропитание осуществляется от сети постоянного тока ( $U=220V$ ,  $v=50Hz$ ). Редуцирующая часть имеет передаточное отношение, равное 72 (в первой ступени  $u'=8$ , во второй ступени  $u''=9$ ), а наружный диаметр корпуса редуктора – 70 мм. Смазочный материал закладываемый в редуцирующий узел представляет собой консистентную смесь графита и гипойдного масла ТАД 17-и. Проведенные эксперименты позволили определить КПД двухступенчатой передачи, который составил 71%, что сопоставимо с КПД одноступенчатых червячных передач.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лустенков М.Е. Планетарные шариковые передачи цилиндрического типа: монография / М.Е.Лустенков, Д.М.Макаревич.-Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2005. -123 с.: ил.
2. Лустенков М.Е. Эллипсоидные шариковые передачи: недостатки и преимущества // Приводная техника. - 2003. - №3(43). - С.20-22.
3. Лустенков М.Е. Расчет геометрии адаптированного профиля эллипсой шариковой передачи // Технология машиностроения. – 2005. -№5. – С.36-38.
4. Лустенков М.Е. Шариковые планетарные передачи для средств малой механизации // Вестник машиностроения. – 2004. - №6. – С.15-17.

в магнитном поле, и определяется величиной межэлектродного промежутка, физико-механическими свойствами наплавляемого ферропорошка и силовым взаимодействием между его частицами.

При прохождении тока через цепочки-микроэлектроды на

Мрочек Жорж Адамович, д.т.н., профессор Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220050, г. Минск, пр. Независимости, 65.

Кожуро Лев Михайлович, д.т.н., профессор Белорусского государственного аграрного технического университета.

Хилько Дмитрий Николаевич, аспирант Белорусского государственного аграрного технического университета.

Беларусь, БГАТУ, 220023, г. Минск, пр. Независимости, 99.