

Д. А. ЛАПИН, аспирант

Д. А. ВОЛЧЕНКОВ, инженер

И. И. ГРИШИН, доктор техн. наук, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева», Российская Федерация, г. Рязань

Б. А. НЕФЕДОВ, доктор техн. наук, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени А. К. Тимирязева», Российская Федерация, г. Москва

D. A. LAPIN, Ph. D. Candidate

D. A. VOLCHENKOV, Engineer

I. I. GRISHIN, Doctor of Engineering, Professor

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education

"Russian State Agrotechnological University named after p. A. Kostychev", The Russian Federation, Ryazan

B. A. NEFEDOV, Doctor of Engineering, Professor

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Russian State

Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev",

The Russian Federation, Moscow

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ КАРТОФЕЛЬНОГО ВОРОХА НА ПРУТКОВОМ ЭЛЕВАТОРЕ УБОРОЧНОЙ МАШИНЫ ПРИ РАБОТЕ ДИСКОВЫХ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ

### THEORETICAL STUDY OF THE TRAJECTORIES OF THE COMPONENTS OF THE POTATO HEAP BAR THE ELEVATOR OF THE HARVESTING MACHINE WHEN THE DISK MODULATORS

**Аннотация.** В статье рассмотрена проблема эффективного разделения компонентов картофельного вороха на полотне конвейера картофелеуборочных машин. Предложена методика теоретического обоснования основных параметров разработанного сепарирующего устройства. Установлено, что применение предложенного устройства позволяет увеличить эффективность сепарации картофельного вороха и повысить эксплуатационную производительность картофелеуборочной машины.

**Ключевые слова:** сепарация, картофелеуборочная машина, машинная уборка, картофель, картофельный ворох, полотно конвейера.

**Abstract.** The article considers the problem of efficient separation of components of potato heap on the canvas conveyor potato machines. The proposed method theoretical substantiation of the basic parameters developed for a separation device. The use of the proposed device allows to increase the separation efficiency of the potato heap and improve operational performance potato harvester.

**Keywords:** separation, potato harvester, machine harvesting, a potato, potato pile, conveyor belt.

Прутковые конвейеры являются одним из основных сепарирующих рабочих органов картофелеуборочных машин [1–4]. Для повышения эффективности разделения компонентов картофельного вороха на полотне конвейера применяют различные конструктивно-технологические схемы ин-

тенсификаторов [5–8]. Группой ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева разработано оригинальное сепарирующее устройство с дисковыми интенсификаторами [9, 10] (рисунок 1), направленное на повышение эксплуатационных показателей

картофелеуборочной машины при работе на тяжелых почвах.

Для обоснованного выбора параметров и режимов работы предлагаемого сепаратора необходимо проведение теоретических исследований, направленных на изучение траекторий движения компонентов картофельного вороха.

Учитывая, что полотно элеватора движется равномерно с постоянной скоростью  $V_n$ , диски с упругими пальцами будут вызывать относительное перемещение компонентов картофельного вороха по полотну. Исследуем движение компонентов картофельного вороха в подвижной системе координат, движущейся со скоростью элеватора (рисунок 2).

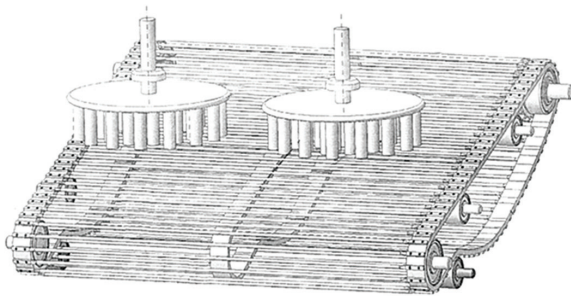


Рисунок 1 – Сепарирующее устройство (вид общий)

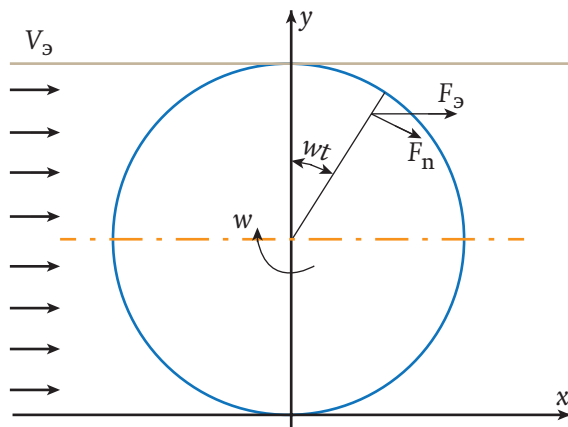


Рисунок 2 – Схема к определению закона движения компонентов картофельного вороха под действием интенсификатора

Так как картофельный ворох неравномерно распределен по ширине полотна элеватора [11], то усилия, действующие на пальцы интенсификатора, меняются по ширине полотна. Для предотвращения сгуживания массы между полотном элеватора и интенсификатором рамка с дисковым интенсификатором выполнена с возможностью подъема.

При проведении исследования введем

следующие допущения:

не учитываем вертикальные перемещения компонентов вороха ввиду его незначительной высоты;

силы сопротивления движению упругих пальцев интенсификатора в ворохе определяются площадью взаимодействия;

взаимодействие вороха с полотном элеватора определяется силами трения, зависящими от высоты вороха.

Рассмотрим взаимодействие дисковых интенсификаторов с картофельным ворохом (рисунок 2). Учитывая, что дисковые интенсификаторы располагаются каждый в своей рабочей зоне по ширине полотна, рассмотрим один диск с упругими пальцами.

Запишем дифференциальные уравнения движения компонентов картофельного вороха по элеватору:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_э + F_n \cos(\omega t) \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = -F_n \sin(\omega t) \end{cases}$$

где  $F_э$  – усилие воздействия элеватора на картофельный ворох, Н;  $m$  – масса компонента вороха, кг;  $F_n$  – усилие воздействия пальца дискового интенсификатора на компоненты картофельного вороха, Н;  $\omega$  – угловая скорость дисковых интенсификаторов,  $c^{-1}$ .

Исследованиями установлено, что картофельный ворох неравномерно распределяется на элеваторе картофелеуборочной машины, повторяя форму картофельной грядки. Допустим, что распределение картофельного вороха по ширине описывается полиномом вида:

$$H = A + Bb + Cb^2,$$

где  $h$  – высота картофельного вороха на элеваторе, м;  $b$  – ширина распределения картофельной грядки на элеваторе, м.

Учитывая, что размер дисковых интенсификаторов равен ширине распределения картофельной грядки на элеваторе, можно записать:

$$b = r \cos(\omega t),$$

где  $r$  – радиус расположения пальцев на дисковых интенсификаторах, м;  $t$  – время поворота дисков с пальцами от начального положения, с.

Тогда усилие сопротивления пальцев дискового интенсификатора определится выражением:

$$F_n = kb_n h$$

или

$$F_n = kb_n(A + Br \cos(\omega t) + Cr^2 \cos^2(\omega t)),$$

где  $k$  – коэффициент сопротивления картофельного вороха, Н/м<sup>2</sup>;  $b_n$  – ширина пальца дискового интенсификатора, м.

Перемещение компонентов картофельного вороха относительно полотна элеватора возможно в случае преодоления внутреннего трения внутри компонентов вороха, либо в случае преодоления сил трения всего картофельного вороха по полотну элеватора. Так как дисковый интенсификатор устанавливается в начале технологического процесса при достаточной высоте вороха, то наиболее вероятен первый случай – преодоления сил внутреннего трения:

$$F_3 = f_{\text{вн}} N,$$

где  $f_{\text{вн}}$  – коэффициент внутреннего трения компонентов картофельного вороха на элеваторе;  $N$  – сила нормального давления вороха на элеватор, Н.

Вес картофельного вороха, приходящийся на один палец дискового интенсификатора, пропорционален объему картофельного вороха. Объем картофельного вороха:

$$V = \frac{\pi r^2}{n} h,$$

где  $V$  – объем картофельного вороха, приходящийся на один палец дискового интенсификатора, м<sup>3</sup>;  $n$  – количество пальцев на дисковом интенсификаторе.

Тогда вес объема картофельного вороха, приходящийся на один палец дискового интенсификатора:

$$P = mg = V\gamma g = \frac{\pi r^2}{n} h\gamma g,$$

где  $\gamma$  – объемная масса картофельного вороха, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $m$  – масса компонента вороха, кг;  $P$  – вес объема картофельного вороха, приходящегося на один палец дискового интенсификатора, Н.

Тогда нормальное давление картофельного вороха на элеваторе, приходящееся на один палец дискового интенсификатора, будет:

$$N = P = \frac{\pi r^2}{n} h\gamma g.$$

Подставив полученные выражения (2)...(5) в уравнение (1), получим:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = f_{\text{вн}} \left( \frac{\pi r^2}{n} \cdot (A + Br \cos(\omega t) + Cr^2 \cos^2(\omega t)) \gamma g \right) + kb_n (A + Br \cos(\omega t) + Cr^2 \cos^2(\omega t)) \cos(\omega t) \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = -kb_n (A + Br \cos(\omega t) + Cr^2 \cos^2(\omega t)) \sin(\omega t). \end{cases}$$

Проведем преобразование выражений. Окончательно получим:

$$\begin{cases} x = x_0 + \frac{f_{\text{вн}}}{m} \gamma g \frac{\pi r^2}{n} \left[ \left( \frac{C}{4} r^2 + \frac{A}{2} \right) t^2 - \frac{Br}{\omega^2} \cos \omega t - \frac{Cr^2}{8\omega^2} \cos 2\omega t \right] + kb_n \left[ \frac{Br^2}{4} t^2 - \frac{3Cr^2 + 4A}{4\omega^2} \cos \omega t - \frac{Br}{8\omega^2} \cos 2\omega t - \frac{Cr^2}{36\omega^2} \cos 3\omega t \right] + V_{x_0} t \\ y = y_0 + \frac{kb_n}{m\omega} \left[ \frac{Br}{2} t + \frac{4A + Cr^2}{4\omega} \sin \omega t + \frac{Br}{4\omega} \sin 2\omega t + \frac{Cr^2}{36\omega} \sin 3\omega t \right] + V_{y_0} t \end{cases} \quad (1)$$

Исследования поперечного профиля картофельного вороха на начале элеватора позволили установить зависимость изменения его высоты от ширины (рисунок 3).

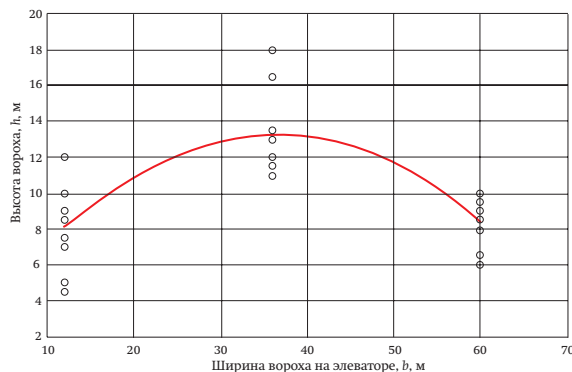


Рисунок 3 – Расположение картофельного вороха по ширине элеватора

Поперечный профиль картофельного вороха на элеваторе описывается уравнением (2). Адекватность модели характеризуется коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,78$ :

$$h = 1,6528 + 0,6389b - 0,0088b^2. \quad (2)$$

На основании выражений (1), (2) с помощью программы MathCad были исследованы траектории движения компонентов картофельного вороха. Исходными параметрами для моделирования были: масса компонента картофельного вороха, коэффициент сопротивления картофельного вороха, коэффициент внутреннего трения, угловая скорость дисковых интенсификаторов, радиус расположения и количество пальцев,

скорость элеватора. В результате проведенных исследований получены траектории движения компонентов картофельного вороха под действием дисковых интенсификаторов (рисунок 4).

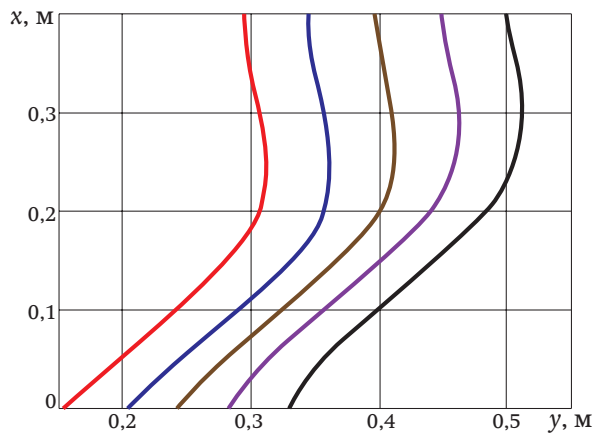


Рисунок 4 – Траектории движения компонентов картофельного вороха

Анализ рисунка 4 показал, что перемещение компонентов картофельного вороха зависит от расположения пальцев на диске интенсификатора. Анализ траекторий позволил установить основные параметры дискового интенсификатора: расстояние между пальцами – 0,15...0,2 м; угловая скорость – 5,6...6,2 рад/с, радиус расположения пальцев – 0,25...0,28 м.

Таким образом, применение дискового интенсификатора с пальцами способствует равномерному распределению компонентов картофельного вороха по элеватору и способствует улучшению сепарации почвы. Применение предложенного устройства позволяет увеличить эффективность сепарации картофельного вороха и повысить эксплуатационную производительность картофелеуборочной машины. Данное устройство является универсальным и может использоваться на любых картофелеуборочных машинах, оснащенных прутковыми элеваторами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инновационные машинные технологии в картофелеводстве России / С. С. Туболев, Н. Н. Колчин, Н. В. Бышов, И. А., Успенский, Г. К. Рембалович // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 10. С. 3–5.
2. Теоретические исследования процесса интенсификации первичной сепарации в картофелеуборочных машинах динамическим методом / Г. К. Рембалович, М. Ю. Костенко, Д. Е. Каширин [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 102. С. 417–431.
3. Технологическое и теоретическое обоснование конструктивных параметров органов вторичной сепарации картофелеуборочных комбайнов для работы в тяжелых условиях / Н. В. Бышов, С. Н. Борычев, И. А. Успенский [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2012. № 4. С. 87–90.
4. Некоторые вопросы организации транспортных работ при машинной уборке картофеля / И. А. Успенский, Г. К. Рембалович, Г. Д. Кокорев [и др.] // Вестник РГАУ. 2010. № 4(8). С. 72–74.
5. Математическая модель технологического процесса картофелеуборочного комбайна при работе в условиях тяжелых суглинистых почв / Н. В. Бышов, С. Н. Борычев, Г. К. Рембалович [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. 2014. № 4(24). С. 59–64.
6. Пат. 129345 Российская Федерация, МПК А 01 D 17/00. Сепарирующее устройство корнеклубнеуборочной машины / Рембалович Г. К., Голиков А. А., Бышов Д. Н. [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (ФГБОУ ВПО РГАУ). – № 2012133070/13 ; заявл. 01.08.2012 ; опубл. 27.06.2013 , Бюл. № 18.
7. Пат. 2454850 Российская Федерация, МПК А 01 D 33/08. Устройство для отделения корнеклубнеплодов от примесей / Павлов В. А., Рембалович Г. К., Безносюк Р. В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (ФГБОУ ВПО РГАУ). – № 2011105511/13 ; заявл. 14.02.2011 ; опубл. 10.07.2012 , Бюл. №19.

8. Пат. 2455011 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 D 33/08А. Устройство для отделения корнеклубнеплодов от примесей / Борычев С. Н., Рембалович Г. К., Успенский И. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанская государственная сельскохозяйственная академия имени проф. П. А. Костычева» (ФГБОУ ВПО РГСХА). – № 2003113825/12 ; опубл. 12.05.2003.
9. Пат. 157146 Российская Федерация, МПК А 01 D 33/08. Сепарирующее устройство корнеклубнеуборочной машины / Волченков Д. А., Рембалович Г. К., Костенко М. Ю., [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (ФГБОУ ВПО РГАТУ). – № 2015120963/13 ; заявл. 02.06.2015 ; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.
10. Волченков Д. А., Лапин Д. А., Рембалович Г. К. Технологические аспекты производства картофеля // Сборник научных трудов по материалам 67-й международной научно-практической конференции «Инновационные подходы к развитию агропромышленного комплекса региона». Рязань : ФГБОУ ВО РГАТУ, 2016. С. 59–63.
11. Рембалович Г. К., Безносюк Р. В. Теоретические основы исследования рабочих органов на основе моделирования процесса вторичной сепарации в картофелеуборочных машинах // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 89 [Электронный ресурс]. URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/05/pdf/57.pdf>. (дата обращения: 07.07.2013).

## REFERENCES

1. Innovatsionnye mashinnye tekhnologii v kartofelevodstve Rossii / S. S. Tubolev, N. N. Kolchin, N. V. Byshov, I. A., Uspenskiy, G. K. Rembalovich // Traktory i sel'khoz mashiny. 2012. № 10. PP. 3–5.
2. Teoreticheskie issledovaniya protsessa intensivatsii pervichnoy separatsii v kartofeleuborochnykh mashinakh dinamicheskim metodom / G. K. Rembalovich, M. Yu. Kostenko, D. E. Kashirin [i dr.] // Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2014. № 102. pp. 417–431.
3. Tekhnologicheskoe i teoreticheskoe obosnovanie konstruktivnykh parametrov organov vtorichnoy separatsii kartofeleuborochnykh kombaynov dlya raboty v tyazhelykh usloviyakh / N. V. Byshov, S. N. Borychev, I. A. Uspenskiy [i dr.] // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kostycheva. 2012. № 4. pp. 87–90.
4. Nekotorye voprosy organizatsii transportnykh rabot pri mashinnoy uborke kartofelya / I. A. Uspenskiy, G. K. Rembalovich, G. D. Kokorev [i dr.] // Vestnik RGATU. 2010. № 4(8). pp. 72–74.
5. Matematicheskaya model' tekhnologicheskogo protsessa kartofeleuborochnogo kombayna pri rabote v usloviyakh tyazhelykh suglinistykh pochv / N. V. Byshov, S. N. Borychev, G. K. Rembalovich [i dr.] // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P. A. Kostycheva. 2014. № 4(24). pp. 59–64.
6. Пат. 129345 Rossiyskaya Federatsiya, МПК А 01 D 17/00. Separiruyushchee ustroystvo korneklubneuborochnoy mashiny / Rembalovich G. K., Golikov A. A., Byshov D. N. [i dr.]; zayavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Ryazanskiy gosudarstvennyy agrotekhnologicheskii universitet imeni P. A. Kostycheva» (FGBOU VPO RGATU). – № 2012133070/13 ; zayavl. 01.08.2012 ; opubl. 27.06.2013 , Byul. № 18.
7. Пат. 2454850 Rossiyskaya Federatsiya, МПК А 01 D 33/08. Ustroystvo dlya otdeleniya korneklubneplodov ot primesey / Pavlov V. A., Rembalovich G. K., Beznosyuk R. V. [i dr.]; zayavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Ryazanskiy gosudarstvennyy agrotekhnologicheskii universitet imeni P. A. Kostycheva» (FGBOU VPO RGATU). – № 2011105511/13 ; zayavl. 14.02.2011 ; opubl. 10.07.2012, Byul. №19.
8. Пат. 2455011 Rossiyskaya Federatsiya, МПК<sup>7</sup> А 01 D 33/08А. Ustroystvo dlya otdeleniya korneklubneplodov ot primesey / Borychev S. N., Rembalovich G. K., Uspenskiy I. A.; zayavitel' i

patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Ryazanskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya imeni prof. P. A. Kostycheva» (FGBOU VPO RGSKhA). – № 2003113825/12 ; opubl. 12.05.2003.

9. Pat. 157146 Rossiyskaya Federatsiya, MPK A 01 D 33/08. Separiruyushchee ustroystvo korneklubneuborochnoy mashiny / Volchenkov D. A., Rembalovich G. K., Kostenko M. Yu., [i dr.]; заявитель i патентообладатель Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Ryazanskiy gosudarstvennyy agrotekhnologicheskiy universitet imeni P. A. Kostycheva» (FGBOU VPO RGATU). – № 2015120963/13; заявл. 02.06.2015 ; opubl. 20.11.2015, Byul. № 32.

10. Volchenkov D. A., Lapin D. A., Rembalovich G. K. Tekhnologicheskie aspekty proizvodstva kartofelya // Sbornik nauchnykh trudov po materialam 67-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsionnye podkhody k razvitiyu agropromyshlennogo kompleksa regiona». Ryazan' : FGBOU VO RGATU, 2016. pp. 59–63.

11. Rembalovich G. K., Beznosyuk R. V. Teoreticheskie osnovy issledovaniya rabochikh organov na osnove modelirovaniya protsessa vtorichnoy separatsii v kartofeleuborochnykh mashinakh // Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2013. № 89 [Elektronnyy resurs]. URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/05/pdf/57.pdf>. (data obrashcheniya: 07.07.2013).

*Лалин Дмитрий Александрович, аспирант*

*Волченков Дмитрий Александрович, инженер*

*Гришин Иван Иванович, профессор, доктор техн. наук, профессор*

*Тел. 8 (4912) 35-37-94*

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

*390044, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1*

*Нефедов Борис Александрович, доктор техн. наук, профессор*

*Тел. 8-4912-35-37-94*

*127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49*