

**И.В. Тарабаева /к.т.н./, В.Ф. Шавлак /к.т.н./**

*ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВАГОНЕТКИ ТОЛКАТЕЛЕМ С ЛИНЕЙНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Проанализированы основные проблемы, возникающие при эксплуатации средств механизации при обмене и откатке вагонеток. В качестве альтернативы предложено использование в технологических схемах обмена и откатки вагонеток в надшахтных зданиях толкателей с линейными индукционными двигателями. Сформулированы цели и задачи проводимых исследований. Составлена математическая модель для исследования процесса перемещения вагонетки толкателем с линейным индукционным двигателем при механическом контакте кулака-толкателя и вагонетки. Проанализированы полученные результаты.*

**Ключевые слова:** *линейные индукционные двигатели, вагонетка, скорость, перемещение, ускорение, математическая модель.*

### **Постановка проблемы**

Развитие шахтного транспорта осуществляется путем усовершенствования существующих транспортных машин, а также путем создания транспортных установок, основанных на новых принципах действия. Одним из наиболее трудоемких процессов шахтного транспорта является обмен вагонеток в клетях и опрокидывателях. Основной причиной низкой эффективности механизации этих процессов является несовершенство и низкая надежность работы оборудования, применяемого в схемах откатки. Управлением и ремонтом этого оборудования занят большой штат обслуживающего персонала, кроме того, большое число рабочих занято ручным трудом при проталкивании и торможении вагонеток.

Одним из основных средств механизации при обмене и откатке вагонеток являются толкатели. В настоящее время в эксплуатации находится большое количество типоразмеров различных толкателей. Большинству из них присущи такие недостатки: большие динамические нагрузки при работе, малая надежность работы отдельных узлов, трудность или невозможность обмена вагонеток с автосцепками.

Технологические схемы обмена и откатки вагонеток в надшахтных зданиях для действующих и реконструируемых шахт предусматривают возможность работы толкателей как при вагонетках с глухим кузовом, так и при вагонетках с откидными днищами.

Разработанные Центрогипрошахтом, ДонУГи и ДонНТУ технологические схемы предусматривают использование толкателей с линейным

индукционным приводом. Поэтому в настоящее время наряду с усовершенствованием существующих механизмов ведутся работы по созданию средств шахтного транспорта на базе современных достижений науки и техники. Так, принцип бегущего магнитного поля позволяет получить поступательное движение с помощью линейного индукционного привода. В связи с этим исследования толкателей с линейными индукционными двигателями (ЛИД) для обмена вагонеток являются своевременными и актуальными. Наличие нежесткой электромагнитной связи между исполнительным органом и приводной системой в таких толкателях обуславливает надежную защиту от экстренных нагрузок и ударов. Простота конструкции обеспечивает возможность получения переменного хода кулака при сложном профиле пути с заходом толкающей тележки в клеть и опрокидыватель.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

В существующих средствах обмена и откатки вагонеток передача тягового усилия исполнительному органу осуществляется трением, зацеплением. Такие механизмы имеют существенные недостатки, на которые указано выше. В последнее время выполнены исследования, позволившие установить, что большая часть повреждений вагонеток происходит из-за воздействия значительных динамических нагрузок, возникающих при перемещении и торможении шахтных вагонеток [1,2].

Линейные индукционные электродвигатели применяются там, где они упрощают конструк-

цию, повышают производительность машин и оборудования, или в тех случаях, когда использование ротационных электродвигателей по их характеристикам невозможно. Применение линейных индукционных электродвигателей наиболее перспективно в промышленном и пассажирском транспорте. В конвейерных поездах индукторы электропривода расположены вдоль рельсового пути, вторичный элемент электродвигателя находится на подвижном составе. Такие поезда удобны при транспортировке угля, руды и строительных материалов. На примере системы городского эстакадного пассажирского транспорта показан другой вариант исполнения линейного электродвигателя, где вторичный элемент установлен вдоль пути в виде токопроводящей вертикальной полосы. А индукторы установлены в движущемся вагоне. Линейные индукционные электродвигатели широко применяются в приводах различных исполнительных механизмов и устройств. Линейные машины находят широкое применение в различных областях производства, таких как привод конвейеров и подъемно-транспортных машин, перекачка жидких металлов, устройства упорного действия, испытательные установки, рельсовая откатка в горнодобывающей промышленности и т. д. Простота их конструкции и высокая надежность позволяют снизить эксплуатационные расходы в сравнении с традиционными системами привода. Линейные индукционные электродвигатели дают непосредственное прямолинейное движение, поэтому разработки в области линейного электропривода ведутся в различных странах мира – США, Японии, Великобритании, Франции, Германии, Канаде, России, Польше и в Донбассе [3-9].

### Цель (задачи) исследования

Целью работы является определение кинематических параметров взаимодействия линейных индукционных двигателей с подвижным составом рельсового транспорта, главным образом на поверхности шахт, и разработка на этой основе средств перемещения шахтных вагонеток.

Для достижения этой цели была поставлена следующая задача: провести теоретические исследования процесса перемещения шахтных вагонеток при использовании в качестве исполнительного органа толкающей тележки, снабженной кулаком и приводом с ЛИД.

### Основной материал исследования

Толкатели с ЛИД могут выполняться по двум принципиальным схемам: с подвижным индуктором, установленным на толкающей тележке, и неподвижным ротором; со стационарным индуктором, закрепленным между рельсами, и гибким подвижным ротором, размещенным на толкающей тележке.

В настоящей работе в качестве примера приведены теоретические исследования по определению кинематических параметров перемещения шахтной вагонетки ВГ-3,3 при ее заталкивании в клеть толкателем с подвижным индуктором, установленным на толкающей тележке, и неподвижным ротором.

На рисунке 1 показано исходное положение вагонетки 1 и толкателя, состоящего из двух горизонтально-сочлененных индукторов 3 и 4. При этом вагонетка находится на стопорах 2 горизонтального предклетьевого участка 5. В процессе движения вагонетка и толкатель преодолевают качающуюся площадку 6 и заходят в клеть 7.

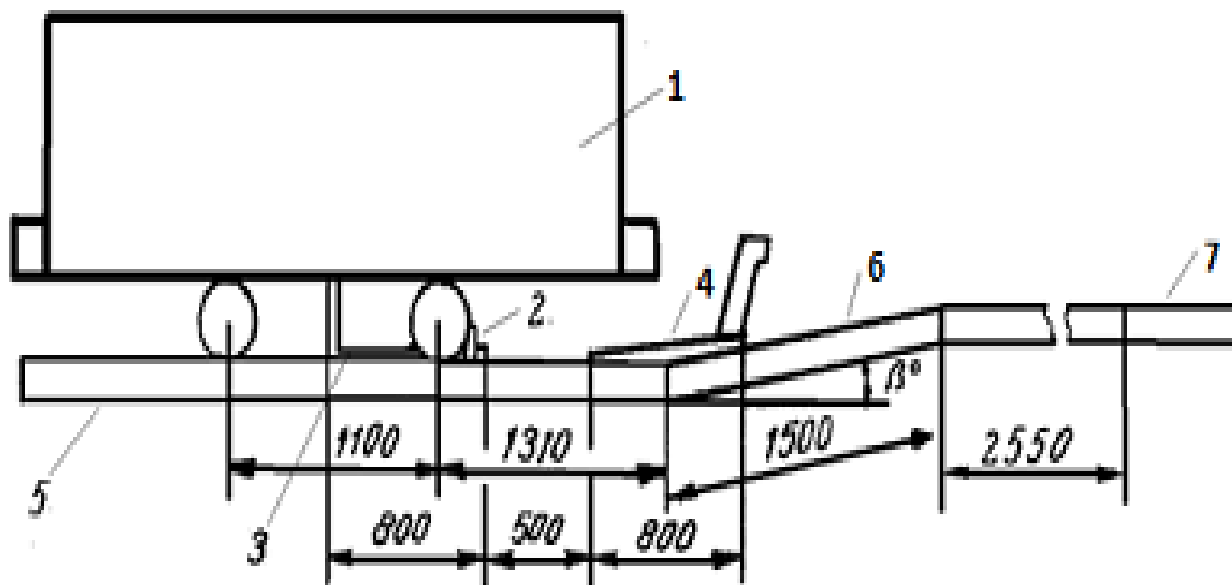


Рис. 1. Расчетная схема для определения кинематических параметров толкателя

Основной силой, обеспечивающей движение вагонетки к клетки в направлении бегущего поля, является электромагнитная тяговая сила  $F_m$ . Как показали ранее выполненные исследования, зависимость тягового усилия  $F_m$  от скорости  $V$  для привода с ферромагнитным ротором в зоне рабочих скоростей приблизительно линейная, что и принято при дальнейших расчетах. Расчетная тяговая характеристика рекомендуемого линейного двигателя в зоне скоростей от 0 до 2 м/с аппроксимируется прямой линией и определяется следующим уравнением:

$$F_T = 2F_0(1 - k\dot{x}), \quad (1)$$

где  $F_0$  – пусковое тяговое усилие линейного двигателя;  $k=0,0915$  – угловой коэффициент.

Для решения исходного уравнения движения (5) и определения основных кинематических параметров весь участок движения вагонетки до клетевых стопоров разбит в соответствии с количеством характерных участков на 12 этапов (табл.1).

Исходные данные для расчета. В качестве привода приняты два ЛИД с полюсным шагом  $\tau=0,09$  м. Пусковое тяговое усилие  $F_0=8000$  Н; синхронная скорость  $V_c=9$  м/с; длина ЛИД – 0,80 м. Масса груженой вагонетки 7280 кг, подвижной части толкателя – 1000 кг.

К числу основных сил, препятствующих движению вагонетки и подвижных кареток, относятся:

- сила сопротивления движению вагонетки;
- сила сопротивления движению привода;
- продольная составляющая веса вагонетки при перемещении ее по качающейся площадке;
- продольная составляющая веса привода при перемещении индукторов по качающейся площадке.

$$\Sigma W = W_B + W_{np}; \quad (2)$$

$$W_g = G_g(w' \cos \gamma \pm \sin \gamma); \quad (3)$$

$$W_{np} = 2G_{un}(w'' \cos \gamma \pm \sin \gamma), \quad (4)$$

где  $\Sigma W$ – суммарная сила сопротивления движению, Н;  $W_g$  – сила сопротивления движению вагонетки, Н;  $W_{np}$  – сила сопротивления движению привода, Н;  $w'=0,008$  – коэффициент сопротивления движению вагонетки;  $w''=0,02$  – коэффициент сопротивления движению подвижного индуктора;  $G_g=72800$  Н – сила тяжести груженой породой вагонетки;  $G_{un}=4000$  Н – сила тяжести тележки толкателя;  $\gamma$ – угол между продольной составляющей веса и линией горизонта, град.

Движение вагонетки описано следующим дифференциальным уравнением [10]:

$$F_T - \Sigma W = M_{np} \cdot \ddot{x}, \quad (5)$$

где  $M_{np} = \frac{G_g + 2G_{un}}{g} \cdot 1,075$  – приведенная масса

вагонетки и привода, кг, 1,075 – коэффициент инерции вращающихся масс.

При решении поставленной задачи принимались следующие допущения:

- движущаяся вагонетка рассматривалась как материальная точка с массой, равной массе всей вагонетки;
- зазор вдоль всей трассы движения принят постоянным и равен 15 мм;
- силы основного сопротивления движению вагонетки и толкающего органа не зависят от их положения на трассе, так как изменения сопротивлений, вызванные уменьшением нормальных составляющих веса при перемещении их по наклонным участкам, незначительны;

Табл. 1. Этапы движения вагонетки при заталкивании ее в клеть

Этапы движения	Расстояние перемещения, м	Содержание этапа
I	0,55	Индуктор 4 полностью выходит на качающуюся площадку
II	0,50	Индуктор 3 передними колесами достигает качающейся площадки
III	0,20	Индуктор 4 передними колесами выходит к клетям
IV	0,06	Вагонетка 1 передними скатами выходит к качающейся площадке
V	0,54	Индуктор 3 полностью выходит на качающуюся площадку
VI	0,20	Индуктор 4 сходит с качающейся площадки
VII	0,36	Вагонетка 1 задними скатами выходит на качающуюся площадку
VIII	0,14	Индуктор 3 передними колесами выходит к клетям
IX	0,26	Вагонетка 1 передними скатами выходит к клетям
X	0,54	Индуктор 3 задними колесами заходит в клеть
XI	0,56	Вагонетка 1 задними колесами заходит в клеть
XII	1,35	Вагонетка 1 перемещается в клеть до стопора

– силы сопротивления движению вагонетки и толкающего органа не зависят от скорости перемещения.

Задача решалась для наиболее тяжелого случая работы – заталкивания грузенной породой вагонетки типа ВГ-3,3 по качающейся площадке, установленной под углом  $\alpha=9^\circ$ , в клеть.

Подставив в уравнение (5) выражения (1), (2), (3), (4) и произведя преобразования, получим:

$$\ddot{x} + 0,082\dot{x} + Ax = B, \quad (6)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от характера изменения сил сопротивления;  $B$  – постоянный член правой части уравнения, зависящий от характера изменения сил сопротивления;  $0,082$  – постоянный коэффициент при  $\dot{x}$ .

Полученное уравнение представляет линейное неоднородное уравнение второго порядка. Общее решение уравнения (6) имеет вид [11]:

$$x = e^{\omega t} (C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t) + D, \quad (7)$$

если корни характеристического уравнения комплексно-сопряженные вида:  $r_{1,2} = \alpha \pm \beta i$ , или, если корни действительны и различны:

$$x = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + D, \quad (8)$$

где  $D$  – частное решение линейного неоднородного дифференциального уравнения.

Постоянные  $C_1$  и  $C_2$ , входящие в уравнения (7) и (8), определяем из начальных условий:

$$x|_{t=0} = 0; \quad \dot{x}|_{t=0} = V_0.$$

Причем для первого этапа  $V_0=0$ , а для всех последующих этапов  $V_0$  равно скорости вагонетки в конце предыдущего этапа.

Продифференцировав дважды уравнения (7) и (8), получим выражения, описывающие характер изменения скорости движения и ускорения вагонетки во времени:

$$\dot{x} = e^{\omega t} [(\beta C_2 + \alpha C_1) \cos \beta t + (\alpha C_2 - \beta C_1) \sin \beta t],$$

или

$$\dot{x} = C_1 r_1 e^{r_1 t} + C_2 r_2 e^{r_2 t} + D,$$

$$\ddot{x} = e^{\omega t} \left[ (\alpha^2 C_1 + 2\beta\alpha C_2 - \beta^2 C_1) \cos \beta t + (\alpha^2 C_2 - 2\alpha\beta C_1 - \beta^2 C_2) \sin \beta t \right],$$

или

$$\dot{x} = C_1 r_1^2 e^{r_1 t} + C_2 r_2^2 e^{r_2 t} + D.$$

Решение исходного уравнения на всех рассматриваемых этапах предполагает разработку алгоритмов и программ на ПЭВМ, что дает возможность автоматизировать процесс исследования кинематических параметров взаимодействия линейных индукционных двигателей с подвижным составом рельсового транспорта и разработать на этой основе средства перемещения шахтных вагонеток.

В дальнейшем анализ результатов будет приведен для случая расчета зависимости пути, скорости и ускорения от времени.

На рисунке 2 приведена форма, разработанная для ввода исходных данных, а на рисунке 3 приведены графики зависимостей пути, скорости и ускорения перемещения вагонетки в функции времени, построенные по результатам расчетов при углах наклона качающейся площадки  $+9^\circ$ .

Из анализа полученных графиков видно, что характер изменения скорости и ускорения зависит от положения вагонетки на рассматриваемой трассе движения, т.е. от величины и характера изменения сил сопротивления движению. Так, например, при перемещении вагонетки по горизонтальному участку пути длиной 1,31 м наблюдается незначительное снижение ускорения, обусловленное характеристикой ЛИД. При этом наблюдается рост скорости. По мере входа вагонетки на качающуюся площадку с  $\alpha=9^\circ$  сопротивление ее движению возрастает, а ускорение падает и становится равным нулю при выходе вагонетки на качающуюся площадку  $S \approx 0,55$  м. Скорость при этом достигает своего максимума.

В дальнейшем вагонетка движется замедленно. Замедление достигает максимума в момент, когда вагонетка выходит полностью на качающуюся площадку. При перемещении вагонетки по качающейся площадке замедление изменяется незначительно. По мере схода вагонетки с качающейся площадки в клеть замедление падает и становится равным нулю, когда вагонетка входит в клеть примерно на половину своей жесткой базы.

### Выводы

Теоретические исследования процесса перемещения шахтных вагонеток с помощью линейных индукционных двигателей показали:

– при перемещении одиночных вагонеток магнитным полем ЛИД движение их происходит в неустановившемся режиме;

– при перемещении одиночных вагонеток

Исследование кинематических параметров взаимодействия ЛИД с подвижным составом рельсового транспорта

Пусковое тяговое усилие линейного двигателя	8000	Н
Синхронная скорость магнитного поля	9	М/С
Длина ЛИД	0,8	М
Сила тяжести грузенной породой вагонетки	72800	Н
Сила тяжести тележки толкателя	4000	Н
Коэффициент сопротивления движению вагонетки	0,008	
Коэффициент сопротивления движению подвижного индуктора	0,02	

Выполнить      Очистка      Выход

Рис. 2. Форма для ввода исходных данных

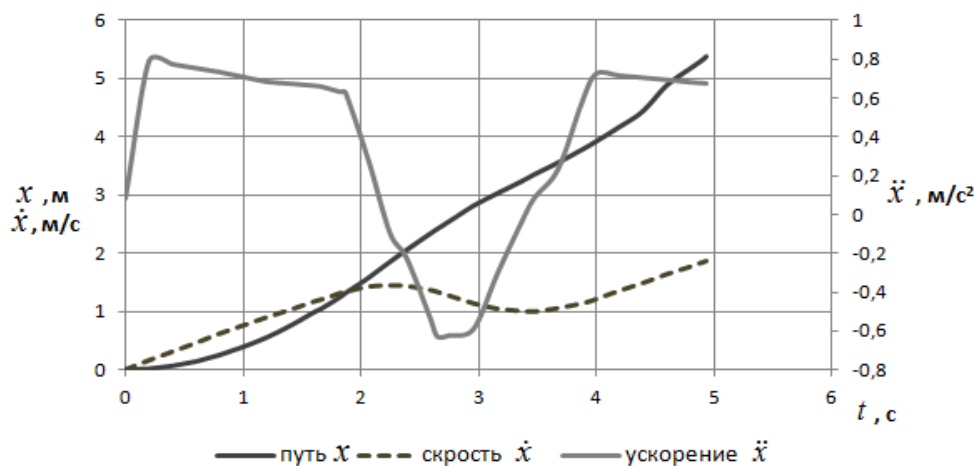


Рис. 3. Кинематические параметры перемещения вагонетки толкателем с подвижным индуктором при угле наклона качающейся площадки  $9^{\circ}$ .

толкателем с подвижным индуктором характер изменения скорости и ускорения зависит от величины и характера изменения сил сопротивления движению;

– проведенные расчеты показывают, что при работе толкателя в переменном режиме необходимое тяговое усилие оказывается меньшим, чем силы статического сопротивления на тяжелом участке профиля пути, и принятое усилие 8000 Н является достаточным.

**Список литературы**

1. Поляков, Н.С. Динамика шахтного рельсового транспорта / Н.С. Поляков, Е.Е. Новиков. – Киев: Наукова думка, 1973. – 198 с.
2. Поляков, Ю.И. Исследование динамических нагрузок на элементы шахтных вагонеток: дис. канд. техн. наук: 05.05.06 / Юрий Ива-

нович Поляков. – Кемерово: ВостНИИ, 1970. – 133 с.

3. Гринченко, В. А. Обоснование базовой конструкции линейного электродвигателя / В. А. Гринченко // Theoretical & Applied Science. – 2013. – Т. 1. – №11 (7). – С. 58-60.
4. Шавлак, В.Ф. Теоретические исследования процесса торможения шахтных вагонеток с помощью магнитных сил / В.Ф. Шавлак, И.В. Тарабаева // Современные проблемы технологии и подготовки инженерных кадров: сб. тр. IV междунар. научн.-метод. конф. г. Хаммаммет, 28 окт. – 6 нояб. 2010 г. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – С. 278-281.
5. Штокман, И.Г. Основы создания магнитных транспортных установок / И.Г. Штокман – М.: Недра, 1972. – 193 с.
6. Поляков, Н.С. Конвейерные поезда в горной

- промышленности / Н.С. Поляков. – Киев: Наукова думка, 1974. – 208 с.
7. Jufer, M. Le moteur lineaire. Developpement theorique et applications / M. Jufer, N. Wavre // Bull. ASE 63 (1972) 15. – P. 844-856.
  8. Ижеля, Г.И. Перспективы применения линейных электродвигателей на новых видах транспорта / Г.И. Ижеля, В.П. Титаренко, В.Ф. Шинкаренко. – Киев: УНИИНТИ и технико-экономических исследований Госплана УССР, 1979. – 174 с.
  9. Мишуков, С.В. Области применения линейных электродвигателей // Nauka-rastudent.ru. – 2014. – No. 12 (12-2014): [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://naukarastudent.ru/12/2280/>
  10. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики: учебник / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: КНОРУС, 2011. – 608 с.
  11. Муратова, Т.В. Дифференциальные уравнения: учебник и практикум для СПО / Т. В. Муратова. – М.: Юрайт, 2016. – 435 с.

I.V. Tarabayeva /Cand. Sci. (Eng.), V.F. Shavlak /Cand. Sci. (Eng.)/  
Donetsk National Technical University (Donetsk)

### THE STUDY OF THE PROCESS OF MOVING A TUB BY THE PUSHER WITH A LINEAR INDUCTION MOTOR USING MATHEMATICAL MODELING

**Background.** *One of the most labor-intensive processes of mining transport is the exchange of tubs in cages and car dumpers. The main reason for the low efficiency of mechanization of these processes is the imperfect and low-reliability equipment used in haulage. The main means for mechanization in the exchange of tubs are the pushers. Currently, in operation, there is a large number of different size pushers. Most of them are characterized by such disadvantages: large dynamic loads during operation, low reliability of individual units, the difficulty or impossibility of exchange of tubs with automatic coupling. The technological schemes of exchange and haulage of tubs in the aboveground buildings of the mines developed by the researchers of Tsentrogiproshaht Institute, Donetsk Scientific-Research Coal Institute, and Donetsk National Technical University require the use of pushers with a linear induction drive in addition to traditional pushers. The use of such pushers allows obtaining the forward movement of the working unit without the use of a traditional drive. In this regard, studies of pushers with linear induction motors for the exchange of tubs are timely and relevant.*

**Materials and/or methods.** *The objective of the study is to determine the kinematic parameters of the linear induction motors interaction with rolling stock of rail transport. For this purpose, we carried out theoretical research of the process of moving a tub by pusher with a linear induction drive. For theoretical studies, the differential equation of a tub motion was written. In the solution of the original equation, the whole site movement of the tub was divided into 12 stages, in accordance with the number of characteristic sites in which the resistance to movement of the tub varied. The solution of the original equation at all the stages was performed on a PC according to the developed algorithm and program, which gave the opportunity to automate the process of kinematic parameters study of the interaction of linear induction motors with a tub.*

**Results.** *The dependence graphs built of the path, velocity, and acceleration of movement of the tub as a function of time. Discovered that when moving a single tub in a magnetic field it moves in the transient mode; when moving a single tub by pusher with a movable inductor the nature of the change of speed and acceleration depends on the size and nature of the changes of the motion resistance forces.*

**Conclusion.** *The calculations show that when the pusher is in the variable mode, the required tractive force is less than the forces of the static resistance on the severe portion of the profile path.*

**Keywords:** *linear induction motors, tub, speed, movement, acceleration, mathematical model.*

#### Сведения об авторах

##### И.В. Тарабаева

SPIN-код: 7102-8328  
Author ID: 847767  
Телефон: +380 (62) 301-09-51  
Эл. почта: inkatar1@yandex.ru

##### В.Ф. Шавлак

SPIN-код: 4837-7126  
Author ID: 852557  
Телефон: +380 (62) 301-07-78  
Эл. почта: shavlak1@yandex.ua

Статья поступила 23.11.2017 г.

© И.В. Тарабаева, В.Ф. Шавлак, 2017  
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин