

## К АНАЛИЗУ МОДЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

© Владимир Константинович Асташев, Виталий Львович Крупенин

ИМАШ РАН, Москва, Россия

[v\\_astashev@mail.ru](mailto:v_astashev@mail.ru), [krupeninster@gmail.com](mailto:krupeninster@gmail.com)

*Аннотация.* В общем виде проведено рассмотрение ультразвуковых технологических процессов, среди которых могут быть вибрационное резание, упрочнение, волочение, выглаживание, сварка и многие другие. Обсуждаются вопросы разработки эффективных моделей систем и перспективы развития технологий.

*Ключевые слова:* ультразвуковая технология, модели машин, колебательная система, операторные уравнения движения, нелинейный резонанс.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-08-00168).*

## TO THE ANALYSIS OF MODELS OF EFFICIENT ULTRASONIC TECHNOLOGY MACHINES

© Vladimir K. Astashev, Vitaly L. Krupenin

IMASH RAN, Moscow, Russia

[v\\_astashev@mail.ru](mailto:v_astashev@mail.ru), [krupeninster@gmail.com](mailto:krupeninster@gmail.com)

*Abstract.* In the article in general form, consideration is given to ultrasonic technological processes, which, among which may be vibratory cutting, hardening, drawing, smoothing, welding and many others. The issues of developing effective models of systems and prospects for the development of technologies are discussed.

*Keywords:* ultrasonic technology, models of machines, oscillatory system, operator equations of motion, nonlinear resonance.

*Acknowledgements.* The work was supported by the RFBR (project No. 18-08-00168).

**Введение.** В статье рассматриваются проблемы динамического моделирования ультразвуковых технологических машин и устройств. Широкое использование этих систем в промышленном производстве, во многих отраслях современного машиностроения и приборостроения, а также медицинской промышленности определяется специфическими и уникальными свойствами различных видов ультразвуковых полей и соответствующих способов обработки.

Среди этих свойств, в частности, способность эффективно воздействовать на твердые и хрупкие материалы; образование поверхностного упрочнения обрабатываемых материалов, повышение пластичности материалов в ультразвуковом поле, наноструктурирование поверхностных и приповерхностных слоев деталей при обработке и многие другие. По этой причине ультразвуковые методы имеют весьма значительное число приложений и проблема разработки схем динамического моделирования соответствующих технических средств – весьма важна и актуальна.

В данной статье в общем виде проведено рассмотрение технологических процессов, среди которых могут оказаться ультразвуковое резание, упрочнение, волочение, выглаживание, сварка и многие другие. Обсуждаются вопросы разработки эффективных схем построения необходимых моделей систем и процессов.

Ультразвуковые технологические машины относятся к общему классу вибрационных машин [1, 2], а также, разумеется, являются машинами виброударного действия, однако выделяются в отдельную группу по следующим основным причинам.

Первая определяется выявленными многочисленными экспериментальными принципиальными особенностями поведения материалов и сред в ультразвуковом поле. Эти особенности проявляются в радикальном изменении наблюдаемых в эксперименте их упругопластических характеристик и реологических свойств, таких как хрупкость, пластичность и вязкость. Например, сухое трение в зоне контакта двух поверхностей под влиянием ультразвуковой вибрации преобразуется в вязкое [3, 4]. При деформировании образцов с наложением ультразвуковой вибрации наблюдается значительное снижение предела текучести материалов.

Вторая причина обусловлена спецификой конструкции основных элементов машины, которые представляют собой стержневые колебательные системы, составленные, как правило, из неоднородных участков и работающие в режиме волноводов [3, 4]. По этой причине при описании колебаний основные элементы машины моделируются системами с распределенными параметрами и описываются дифференциальными уравнениями с частными производными. Взаимодействие рабочего органа с изделием приводит к сильной нелинейности колебательной системы в рабочих режимах.

Универсальная триада, определяющая всякую вибрационную машину «двигатель – колебательная система – рабочий процесс» для ультразвуковых машин конкретизируется триадой «возбудитель ультразвуковой вибрации-волновод- ультразвуковое воздействие».

Рабочий процесс ультразвуковой технологической машины осуществляется рабочим органом, которому кроме формообразующего движения подачи относительно обрабатываемого изделия или среды сообщаются высокочастотные (ультразвуковые) колебания определенного направления, частоты и интенсивности. Конструкция машины и ее элементов определяется в значительной степени схемой технологического процесса, выполняемого рабочим органом.

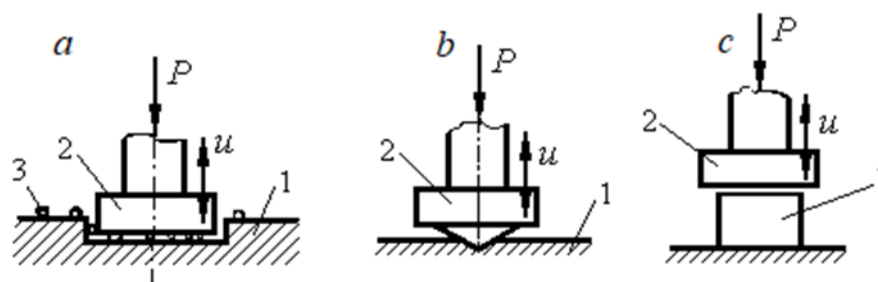
Колебания возбуждаются двигателем, в роли которого чаще всего выступают магнитострикционные или пьезоэлектрические вибровозбудители; их передача рабочему органу обеспечивается колебательной системой (волноводом) зачастую с изменением направления и амплитуды.

Современные ультразвуковые машины содержат также специфические системы управления [3]. При осуществлении ультразвуковой обработки, системы управления во многом ответственны за эффективность технологического процесса, и даже определяют целесообразность его применения.

**1. Схемы технологических процессов.** Рассмотрим некоторые характерные ультразвуковые технологические процессы (рис.1). На рис.1, а показана возможная схема резания хрупких и твердых материалов.

Обрабатываемое изделие 1 помещается под торец инструмента 2, которому сообщаются высокочастотные колебания в направлении, перпендикулярном к поверхности обработки. В рабочую зону, образованную торцом инструмента и поверхностью изделия, подается абразивная суспензия. Инструмент поджимается к изделию статическим усилием  $P$  подачи.

Под действием ударов инструмента по зернам абразива, оседающим из суспензии, на обрабатываемой поверхности, происходит разрушение материала изделия, и образуется полость, повторяющая форму инструмента.



**Рис.1.** Ультразвуковая обработка: *a* - резание; *b* – поверхностное упрочнение; *c*- осадка металла.

Со времени изобретения [5] способ ультразвуковой обработки получил признание и широкое применение для резания трудно обрабатываемых традиционными методами материалов, таких как стекло, керамика, полупроводниковые материалы, феррит, алмаз, твердые сплавы и т.д. Многочисленными экспериментами [3, 6] установлено, что разрушение материала происходит исключительно в результате соударений инструмента с обрабатываемой поверхностью через частицы абразива. Показано, что движение инструмента представляет собой *периодический виброударный процесс*, в котором соударения с изделием следуют с частотой колебаний инструмента, причем амплитуда силы удара является основным фактором, влияющим на скорость резания [7]. Скорость резания при прочих равных условиях возрастает с увеличением амплитуды и частоты колебаний инструмента, а также статического усилия подачи [7 - 9]. Ультразвуковой обработке лучше поддаются хрупкие материалы, причем скорость резания тем выше, чем меньше твердость материала.

Для разрушения материала между инструментом и изделием необходимо создать силы, достаточные для получения в окрестности зерен абразива напряжений, превышающих предел прочности обрабатываемого материала. Эти силы могут достигать значительных величин. Вместе с тем процесс резания происходит даже при очень малых усилиях статического прижима инструмента к изделию. Таким образом, введение ультразвуковых колебаний в зону обработки позволяет существенно снизить статические усилия, необходимые для преодоления предельных нагрузок.

Эффект снижения необходимых для проведения процесса статических сил является характерной особенностью большинства ультразвуковых технологических процессов, связанных с разрушением или пластическим деформированием обрабатываемой среды. На рис. 1, *b* показана схема процесса поверхностного упрочнения [10, 11] детали 1, происходящего в результате пластического деформирования поверхностного слоя металла при ультразвуковых колебаниях наконечника 2. И в этом случае для поддержания технологического процесса требуется относительно малая статическая сила прижима  $P$ , как правило, на порядок меньшая необходимой для пластической деформации материала при отсутствии колебаний наконечника. Ультразвуковое поверхностное упрочнение протекает наиболее интенсивно, а снижение статического прижима наиболее значительно, если рабочий режим колебаний наконечника представляет собой, как и при ультразвуковом резании (рис.1, *a*), периодический виброударный процесс [12]. Необходимо также отметить, что упрочнение сопровождается возникновением «правильных» наноструктурных образований в поверхностных и приповерхностных слоях материала [4].

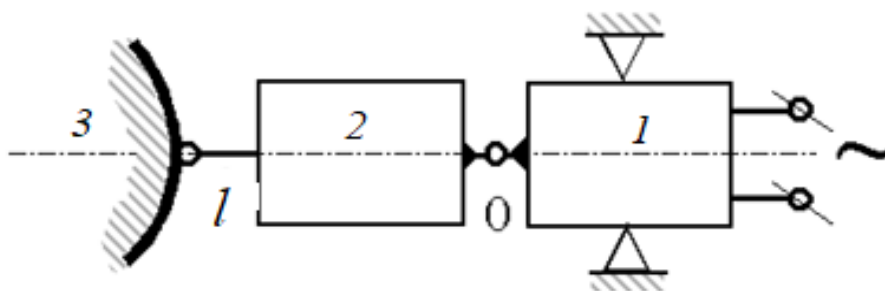
По аналогичной схеме строится процесс осадки металлов (рис.1, *c*) с наложением ультразвуковых колебаний [13]. Образец 1 подвергается совместному воздействию статической нагрузки  $P$  и высокочастотных колебаний инструмента 2. В результате происходит его пластическое деформирование и во время действия ультразвуковой вибрации образец размягчается.

Список популярных ультразвуковых технологий может быть значительно расширен: сварка, токарная обработка, волочение проволоки и многие другие [10 - 14].

**2. Математическая модель ультразвуковой технологической машины.** Как было отмечено выше, в ультразвуковой технологической машине независимо от ее назначения и конструктивных особенностей можно выделить двигатель - возбудитель колебаний и колебательную систему, служащую для передачи колебаний обрабатываемому объекту или среде.

Исходя из этого, представим машину в виде обобщенной схемы, показанной на рис. 2, а, где колебательная система 2 связана в точке 0 с возбудителем колебаний 1, а в точке 1 взаимодействует с технологической нагрузкой 3, создаваемой при выполнении рабочего процесса.

Возбудитель колебаний производит преобразование электрических колебаний на его входе в механические колебания на выходе 0 возбудителя, который является входным элементом колебательной системы. Колебательная система трансформирует входные воздействия, создавая на выходе 1 наиболее благоприятные условия выполнения технологического процесса. Схема на рис. 2, а представляет собой цепную систему соединенных между собой элементов [15 - 17].



**Рис. 2.** Ультразвуковая машина: 1- вибровозбудитель, 2- колебательная система; 3 – технологическая нагрузка.

Расчленим цепную систему на составляющие подсистемы, выделив возбудитель колебаний 1, колебательную систему 2 и технологическую нагрузку 3 и заменим их взаимодействие силами, приложенными к узловым точкам.

Силы, действующие на смежные подсистемы в узловой точке, равны по величине и противоположны по направлению, т.е. отличаются только знаком. Теперь можно, рассматривая вначале отдельные части системы, и составляя уравнения движения механической (колебательной) подсистемы и электромеханической (возбудителя колебаний) подсистемы, получить общее уравнение движения ультразвуковой технологической машины. Специфику технологического процесса можно учесть введением его динамических характеристик [3, 4].

Указанные уравнения весьма удобно выписывать в операторной форме, при помощи динамических податливостей [15], ставящих в соответствие силам, приложенным в некоторых характерных точках систем, перемещения в каких-либо других или тех же самых точках.

Методы динамических податливостей предполагают, что системы – линейны. Операторы динамических податливостей могут строиться, не только исходя из вида дифференциальных или интегро-дифференциальных уравнений движения, но и по результатам натурных экспериментов. Динамические податливости – это отклики линейных систем на эталонные

синусоидальные воздействия  $\exp(i\omega t)$ . Заметим также, что использование операторных методов удобно для получения определяющих уравнений электромеханических систем.

В данном случае, считая колебательную систему линейной и стационарной, полагая, что ее движение описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, обозначив динамическую податливость  $L_{sx}(i\omega)$  для описания установившихся колебаний произвольного элемента  $x$  колебательной системы запишем:

$$u_x(t) = L_{0x}(i\omega) \cdot f_0(t) - L_{lx}(i\omega) \cdot f_l(t), \quad (1)$$

где  $u_x(t)$  - искомое перемещение;  $f_0(t)$  и  $f_l(t)$  - силы, приложенные к элементам «0» и «l» (рис.2);  $L_{0x}(i\omega)$  и  $L_{lx}(i\omega)$  - динамические податливости, ставящие в соответствие этим силам перемещение элемента  $x$ .

Заметим, что символ  $(i\omega)$  можно понимать как оператор дифференцирования по времени:

$$(i\omega) \equiv p \equiv d/dt.$$

Входной элемент 1 (рис. 2) является, по сути дела, преобразователем электрического сигнала источников тока или напряжения в ультразвуковую вибрацию. Для выходной силы  $f_0(t)$  можно получить аналогичное (1) операторное выражение, зависящее от коэффициентов электромеханической связи и определяющее взаимовлияние электрической и механической частей привода, а также других параметров. В результате ряда преобразований можно прийти к операторному уравнению технологической машины вида

$$u_l(t) = u_{l0}(t) - L_M(i\omega) \cdot f_l[u_l(t); \dot{u}_l(t)]; \quad (2)$$

Здесь  $u_l(t)$  - закон движения исполнительного органа машины,  $u_{l0}(t)$  - закон движения в режиме холостого хода;  $f_l[u_l(t); \dot{u}_l(t)]$  - динамическая характеристика рабочего процесса (см. далее); полная, приведенная к рабочему органу динамическая податливость колебательной системы и двигателя

$$L_M(i\omega) = L_n(i\omega) - \frac{L_{0l}^2(i\omega)}{L_{00}(i\omega) + L_n(i\omega)}. \quad (3)$$

При этом  $L_n(i\omega)$  - динамическая податливость преобразователя (рис. 2, подсистема 1), зависящая от коэффициентов электромеханической связи и типа внешнего питания машины. Динамическая характеристика рабочего процесса в отдельных случаях может быть представлена линейной зависимостью силы  $f_l$  от перемещения  $u_l(t)$  рабочего органа  $f_l(t) = L_n^{-1}(i\omega) \cdot u_l(t)$ , где  $L_n(i\omega)$  - динамическая податливость технологической нагрузки.

Так записывается, например, взаимодействие инструмента с изделием при непрерывном деформировании образца, происходящем в пределах упругой зоны характеристики материала. Для линейного упруговязкого материала с учетом вида рассматриваемых процессов можно записать

$$f_l(t) = k_0 u_l(t) + \beta_0 \dot{u}_l(t) = (k_0 + i\omega \cdot \beta_0) \cdot u_l(t). \quad (4)$$

где  $k_0$ ,  $\beta_0$  - статическая жесткость образца и коэффициент сопротивления деформированию. В общем случае характеристика  $f_l$  - нелинейна. Некоторые примеры (см. [14]) функций  $f_l$  показаны на рис.3 и рис.4.

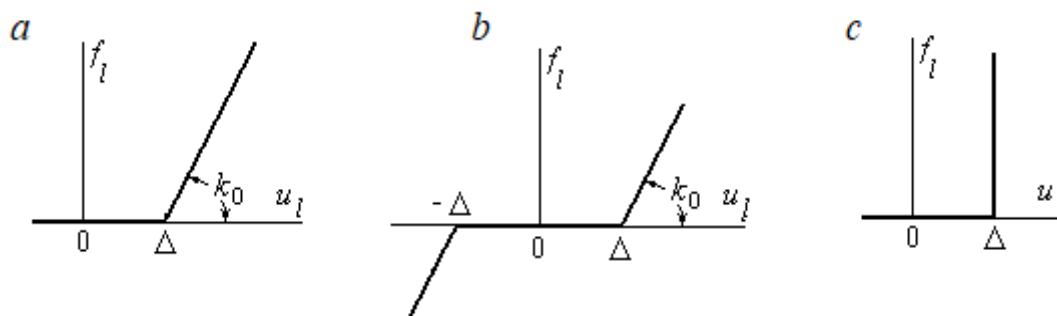


Рис.3. Динамические характеристики процесса

При деформировании упругого образца вибрирующим инструментом возможно установление периодического импульсного (виброударного) режима нагружения.

Такой процесс описывается с помощью характеристики одностороннего упругого ограничителя (рис.3, a), уравнение которой имеет вид  $f_l(u_l) = k_0(u_l - \Delta)\eta(u_l - \Delta)$ , где  $k_0$  - статическая жесткость ограничителя;  $\eta(u)$  - единичная функция.

Как правило, величина  $k_0 \gg 1$  и поэтому нелинейные характеристики такого типа называют «сильными» [15].

На рис.3, b показана симметричная сильно нелинейная пороговая характеристика. Если можно считать соударение инструмента мгновенным, то  $k_0 \rightarrow \infty$  и возможно применение стереомеханической модели удара. Символический вид характеристики технологического процесса дан на рис. 3, c.

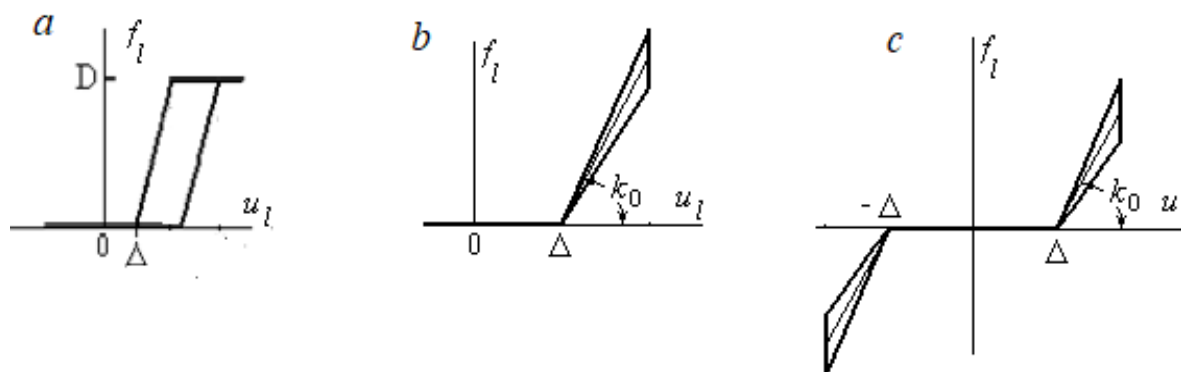


Рис.4. Динамические характеристики процесса с гистерезисом

Более реалистичными оказываются, модели, учитывающие потери энергии при взаимодействии. При рассмотрении мгновенных соударений используется известная гипотеза Ньютона [18]. В случаях, когда временем ударного взаимодействия нельзя пренебречь, стереомеханическая модель удара оказывается неприменимой и приходится использовать иные модели. Одна из них показана на рис.4, a:  $f_l(u_l, \dot{u}_l) = k_0(u_l - \Delta)\eta(u_l - \Delta)(1 + \theta \text{sgn} \dot{u}_l)$ . Направления деформирования и разгрузки определяются при обходе петли гистерезиса по часовой стрелке. Площадь петли определяет параметр  $\theta$ .

Характеристики такого рода в общем случае можно представить в виде  $f_l(u_l, \dot{u}_l) = f_l^{(1)}(u_l) + f_l^{(2)}(u_l, \dot{u}_l)$ , где первое слагаемое  $f_l^{(1)}(u_l)$  определяет упругие силы, а второе, удовлетворяющее условию  $f_l^{(2)}(u_l, \dot{u}_l) = -f_l^{(2)}(u_l, -\dot{u}_l)$ , описывает диссипативные силы. На рис.4, b: показан симметричный аналог приведённой характеристики:

$$f_i(u_i) = k_0(|u_i| - \Delta)\eta(|u_i| - \Delta)\operatorname{sgn}u_i(1 + \theta\operatorname{sgn}i_i).$$

Наконец, на рис.4, с показана динамическая характеристика процессов пластического деформирования материала в импульсном режиме [3, 4]. Величина  $D$  - предел упругости.

Отметим, что вид операторного уравнения (2) показывает, что настройка машины на режим максимальной эффективности (резонанс), вообще говоря, должна проводиться на частотах, отличных от резонанса, реализуемого на режиме холостого хода, когда максимума достигает функция  $u_{i0}(t)$ . Это обстоятельство весьма принципиально, поскольку требует использования специальных методов анализа [3, 4, 19].

**Заключение.** Ультразвуковые технологии обеспечивают универсальный способ организации эффективных воздействий на обрабатываемые детали и среды, оставаясь при этом подклассом вибрационных технологий, однако основные компоненты определяющих элементов машины «привод – колебательная система – рабочий процесс» конкретизируется: «электромеханический возбудитель – волновод – технологический процесс».

Ультразвуковые технологические машины могут анализироваться с единых позиций и описываться нелинейным операторным уравнением, к которому могут быть применены методы современной нелинейной механики и теории колебаний и волн.

### Список литературы

1. Astashev V.K, Babitsky V.I., Kolovsky M.Z. Dynamics and Control of Machines. - Berlin: Springer-Verlag., 2000. - 235 p.
2. Вибрации в технике: Справочник. Т.4. Вибрационные машины и процессы. Лавенделл Э.Э. (ред.). - М.: Машиностроение, 1981. - 510 с.
3. Astashev V.K., Babitsky V.I. Ultrasonic Processes and Machines. Dynamics, Control and Applications. - Berlin: Springer-Verlag, 2007. - 330 p.
4. Асташев В.К., Крупенин В.Л. Нелинейная динамика ультразвуковых технологических процессов. - Москва: МГУП им. Ивана Федорова, 2016. - 372 с.
5. Farrer J.O. Method of Abrading. – Patent of Great Britain No 602801, 1948.
6. Розенберг Л.Д., Казанцев В.Ф. О физике ультразвуковой обработки твердых материалов// ДАН СССР. – 1959. - том 124, № 1. - С. 79 – 82.
7. Nishimura G., Shimakawa S. Ultrasonic mechanical machining (Part IV)// Journ. Fac. Eng. Univ., Tokyo. - 1959. - v. 26, No 1. - P. 13 – 35.
8. Goetze D. Effect of Vibration Amplitude, Frequency and Composition of Abrasive Slurry on the Rate of Ultrasonic Machining in Ketoes Tool Steel// Journ. Acoust. Sos. Amer. - 1956. - vol. 28, No 6. - P. 1033 - 1037.
9. Neppiras E.A. Report on ultrasonic machining// Metalworking production. - 1956. - vol. 100, No 29. - P. 1377-1382.
10. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. - М.: Машиностроение, 1980. - 237 с.
11. Марков А.И., Озерова М.А., Устинов И.Д. Применение ультразвука при алмазном выглаживании деталей// Вестник машиностроения. – 1973. - № 9. - С. 57-61.
12. Astashev V., Babitsky V. Ultrasonic cutting as a non-linear (vibro-impact) process// Ultrasonics. – 1998. - No 6. - P. 89-96.
13. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвук и пластичность. - Минск: Наука и Технология, 1976. -446 с.
14. Astashev V.K., Semenova E.B. The Dynamics of an Ultrasonic Drawing Process // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2013. - Vol. 42, No. 1. - P. 45–48.
15. Babitsky V.I., Krupenin V.L. Vibration of Strongly Nonlinear Discontinuous Systems. - Berlin: Springer-Verlag, 2001. - 404 p.

16. Лурье И. А. Крутильные колебания в дизельных установках. - М.- Л.: Воениздат, 1940. - 219 с.
17. Терских В.П. Метод цепных дробей в применении к исследованию колебаний механических систем. - Л: Судпромгиз, 1955. - 708 с.
18. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. - М: Наука, 1977. - 224 с.
19. Vladimir Astashev, Vitaly Krupenin. Efficiency of vibration machines //Engineering for Rural Development. - Jelgava, Latvia. – 2017. – P. 108-113.

*Дата поступления: 6 июля 2018 г.*