

УДК 629.113

А.Г.КИТОВ, к.т.н. проф., зав. каф. «Автомобильный транспорт», НГПУ им. К. Минина, e-mail: atkaf@pochta.vgpi.ru

И.А.СОГИН, инженер, директор ООО НПО «Гидромехстрой», г. Нижний Новгород

В.А.ШАПКИН, д.т.н., проф. каф. «Строительные и дорожные машины», НГТУ им. Р.Е.Алексеева, e-mail: fromfriends@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШНЕКОВОГО РЫХЛИТЕЛЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

A.G.Kitov, I.A.Sogin, V.A.Shapkin

THE MATHEMATICAL MODEL OF THE SCREW RIPPER FOR WORKING WITH BOTTOM SEDIMENTS.

В данной статье произведен анализ предыдущих исследований в области разработки донных отложений шнекороторными органами. Рассмотрены кинематические параметры рабочего органа, физико-механические свойства донного грунта, конструктивные параметры рабочего органа. На основании математической модели, составленной на базе системы уравнений, описывающих движение шнекового рабочего органа, разработаны его оптимальные параметры. Определен поправочный коэффициент для проектирования рациональных параметров комплекса по добыче донных грунтов

Ключевые слова: донные отложения, очистка водоемов, методика, параметры движения, расчетные значения, поправочный коэффициент для проектирования, шнековый рыхлитель.

In this article the mathematical model of the screw ripper for working with bottom sediments has presented. The analyses of the previous research works in the area of cleaning water from bottom sediments by screw ripper was performed. The kinematical parameters of the working body, physical and mechanical properties of bottom soil and design parameters of the working body were considered. Based on the developed mathematical model, which described the movement of the screw ripper, was implemented his optimal parameters. The correction factor for the design of the rational parameters for bottom soils' extraction complex was determined.

Key words: Keywords: screw ripper, rotary-screw ripper, mathematical-mechanical modeling, traffic conditions, the calculated values, the design parameters.

Донные отложения – донные наносы и твердые частицы, образовавшиеся и осевшие на дно водного объекта в результате внутриводоемных физико-химических и биохимических процессов, происходящих с веществами как естественного, так и техногенного происхождения (ГОСТ 17.1.5.01-80).

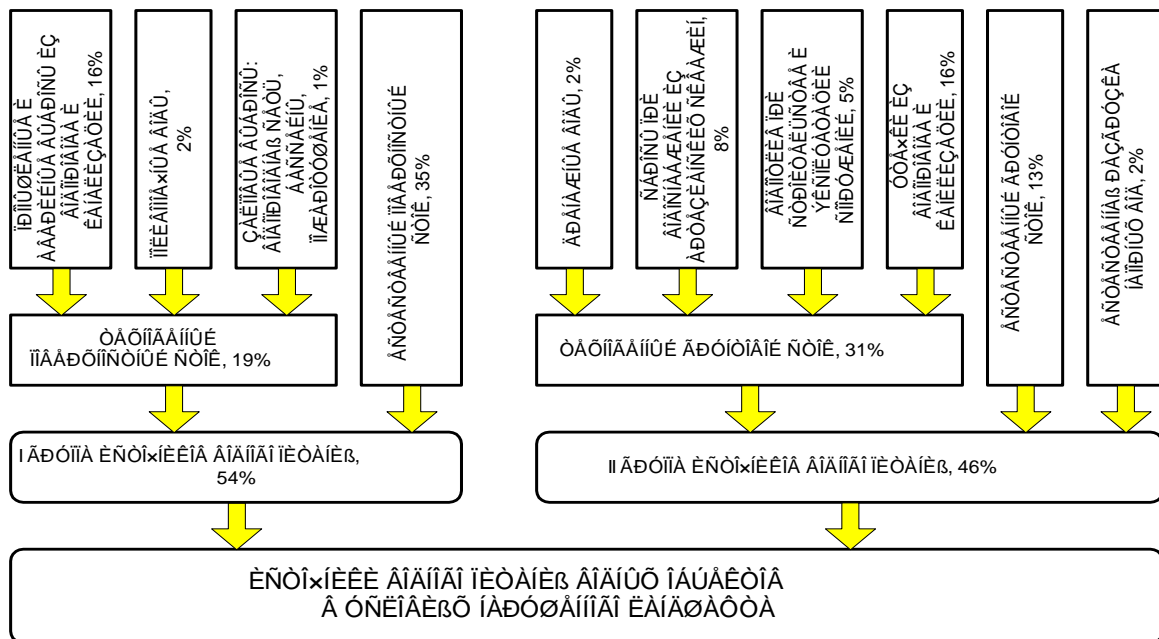


Рисунок 1 – Структурная схема источников водного питания водных объектов

Как показывает практика, в основном загрязняющие вещества поступают в водные объекты с поверхностным стоком. Структурная схема источников водного питания водных объектов, расположенных в условиях нарушенного ландшафта, показана на рисунке 1.

Донные отложения образуются промышленными и бытовыми стоками, атмосферными сточными водами и сапропелевыми отложениями в самих водоемах, которые накапливаются в результате оседания естественной органики: листвы, отмерших водных растений, веток, экскрементов рыб и водоплавающих птиц. Донные отложения можно разделить на связанные и несвязные. Связные донные отложения – это глинистые грунты, сапропели, илы. К несвязным донным отложениям относятся пески, песчано-гравийная смесь, крупнообломочные грунты. Классификация донных отложений показана на рисунке 2.

Вопросам разработки техники и технологии очистки водоемов от донных отложений уделяется большое внимание в работах отечественных и зарубежных ученых. Большой вклад в исследования по добыче сапропеля и оценке экологического состояния водных объектов внес профессор В.И.Сметанин [3]. Следует отметить работы, которые провели в этой области Б.М.Шкундин, М.Ф.Новиков, Г.А.Нурок, И.М.Ялтанец, Д.В.Рощупкин, А.И.Харин.

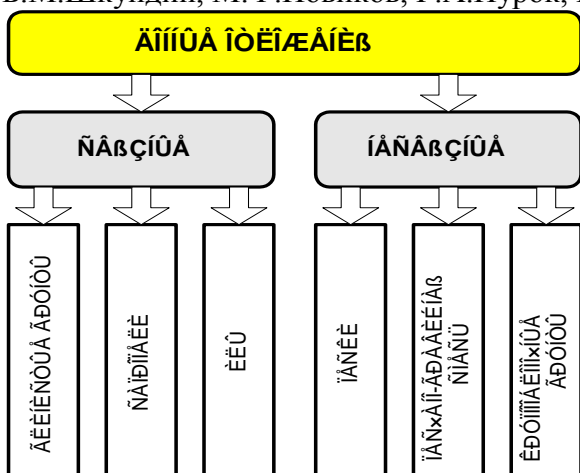


Рисунок 2 – Классификация донных отложений

Достаточно давно известно несколько результативных направлений использования сапропелей и продуктов их переработки, о чем подробно говорится в работах А.И.Фомина, М.З. и Н.В.Лопотко, Н.В.Кислова, С.М.Штина [7]. Работы Д.В.Рощупкина, Б.Е.Романенко, А.И.Харина, С.П.Огородникова [2], Б.М.Шкундина позволили установить основные закономерности процесса всасывания и создать высокоэффективные рабочие органы землесосных снарядов.

Основой теоретических и экспериментальных исследований, кроме указанных выше, послужили работы, посвященные процессу резания донных отложений, основной вклад в которые был внесен В.П.Горячкиным,

В.Г.Домбровским, А.И.Зелениным, Ю.А.Ветровым [1] и др. Работы В.Д.Абезгауза, Г.Н.Синеокова, А.Ш.Рабиновича также посвящены процессу резания донных отложений.

Сотрудниками лаборатории гидромеханизации Калининского политехнического института (г. Тверь) С. П. Огородниковым, В. А. Балябиным, И. И. Михеевым рассмотрен ряд вопросов процесса износа и затупления режущих элементов фрезерных землеройно-добывающих машин.

Теоретическим и экспериментальным исследованиям роторно-винтовых или шнековых машин (где шнек является движителем) посвящены работы ряда зарубежных ученых, например, Дж.Гордона, Х.Дугоффа, Р.Эрлиха, А.Солтынского, Б.Коула и др. Исследованиям в этой области отводится значительная часть научных работ отечественных ученых: Н.Ф.Кошарного, А.Ф.Николаева, С.В.Рукавишникова, В.И.Володина, В.И.Захаренкова, А.П.Куляшова, В.А.Шапкина [5,6], в т.ч. и ученых Нижегородской научной школы.

В целом анализ выполненных исследований показал, что к настоящему времени нет исследований шнековых рабочих органов для разработки донных отложений.

Параметры шнекового рабочего органа для разработки донных отложений. При разработке донных отложений необходимо создать рабочий орган или определить параметры рабочего органа, который обеспечит отделение донных отложений от массива и подачу к всасывающему патрубку перекачивающей системы.

Для решения этой задачи необходимо определить зависимости:

- кинематических параметров рабочего органа: скорости подачи рабочего органа в направлении движения добывающего комплекса, скорости вращения рабочего органа,
- физико-механических свойств донного грунта: сопротивление смятию, сопротивление срезу, плотность,
- конструктивных параметров рабочего органа (диаметров лопастей и базового цилиндра, длины, угла навивки лопастей, количества лопастей).

На основании системы сил, действующих на рабочий орган (рисунок 3), составлено дифференциальное уравнение движения рабочего органа.

Допущения:

- пренебрегаем гидросилами – архимедовой, участием масс воды,
- взаимодействие с базовой машиной сводится к силе подачи,
- в патрубок подается то количество грунта, которое удерживается на рабочем органе, или меньше.

Опыт проведения работ по добыче сапропеля и разработке донных отложений [7] показал, что на шнековый рабочий орган будут действовать следующие силы. На рисунке 3 представлена схема сил, действующих на шнековый рабочий орган при разработке донных отложений.

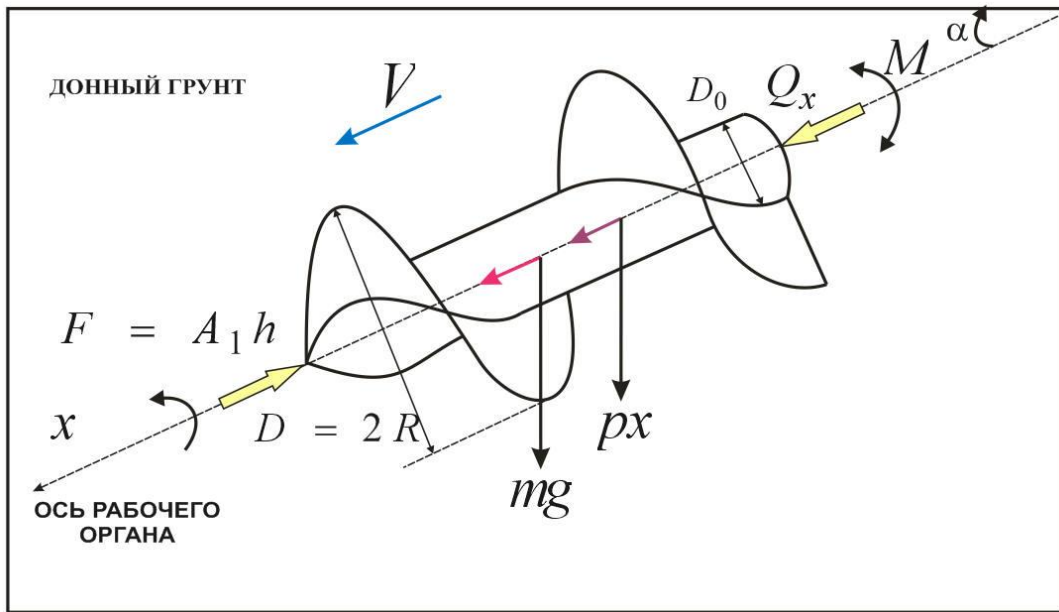


Рисунок 3 – Система сил, действующих на шнековый рабочий орган

Условные обозначения:

x – перемещение рабочего органа вдоль своей оси при разработке донного грунта, м,

V – скорость перемещения (подачи) рабочего органа, м/с,

Q_1 – усилие подачи рабочего органа, Н,

dx – элементарное приращение подачи, м,

mg – сила тяжести рабочего органа, Н,

p – сила тяжести донного грунта на единицу длины рабочего органа, Н/м,

$p \cdot x$ – сила тяжести донного грунта, находящегося на рабочем органе (между лопастями), Н, в этот параметр входит высота лопасти h_L (рисунок 4).

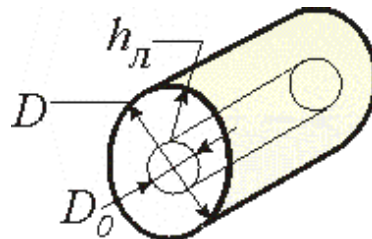


Рисунок 4 – Иллюстрация к определению объема грунта на шнековом рабочем органе

ρ – плотность грунта, кг/м³, ρ_e – плотность воды, кг/м³,

h – толщина отделяемого донного грунта (толщина отделяемой стружки), м,

$F_{сопр}$ – сила сопротивления перемещению рабочего органа от грунта, Н,

A_1 – удельная сила сопротивления перемещению рабочего органа (сопротивление подаче) – (зависит от физико-механических свойств донного грунта и конструктивных параметров рабочего органа) на единицу толщины срезаемого грунта, Н/м,

M – крутящий момент на валу рабочего органа, Н·м,

$D = 2R$ – внешний диаметр рабочего органа, м,

l – длина рабочего органа, м,

S – лобовая площадь рабочего органа, м²,

α – угол наклона рабочего органа к горизонту, рад,

β – это угол наклона винтовой лопасти от перпендикуляра к оси шнека, рад,

B_1 – удельная сила сопротивления вращению рабочего органа при разрушении дон-

ного грунта (сопротивление срезу) - (зависит от физико-механических свойств донного грунта и конструктивных параметров рабочего органа), определяет величину момента, необходимого для отделения (разрушения) слоя толщиной h , Н/м,

ω – угловая скорость вращения рабочего органа, $2\pi/c$, c^{-1}

Математическая модель шнекового рабочего органа для разработки донных отложений. На основании схемы сил, действующих на рабочий орган составлена система уравнений, описывающая движение шнекового рабочего органа, которая имеет вид:

$$\begin{cases} m + \frac{p \cdot x}{g} \cdot V \frac{dV}{dx} = A \cdot h - Q - mg \cdot \sin \alpha - p \cdot x \cdot \sin \alpha \\ M = B \cdot R \cdot h + (m + p \cdot x) R^2 \omega^2 \end{cases} \quad (1)$$

Выражение для момента на рабочем органе складывается из момента сопротивления резанию и момента инерции вращающихся масс.

Введя обозначения $A = \frac{A_1}{\sin \alpha}$, $Q = \frac{Q_1}{\sin \alpha}$, преобразовав первое уравнение системы и выразив из второго уравнения величину h , получим:

$$\begin{cases} \left(\frac{mg + p \cdot x}{g} \right) \cdot V \frac{dV}{dx} = A \cdot h - Q - p \cdot x \\ h = \frac{M - (m + p \cdot x) R^2 \omega^2}{B \cdot R} \end{cases}$$

Выражая из первого уравнения $V \frac{dV}{dx}$, получим :

$$\begin{cases} V \frac{dV}{dx} = \frac{A \cdot h - Q - p \cdot x}{mg + p \cdot x} \cdot g \\ h = \frac{M - (m + p \cdot x) R^2 \omega^2}{B \cdot R} \end{cases}$$

Подставляя второе уравнение системы в первое и выполнив дальнейшие преобразования, получим:

$$V \frac{dV}{dx} = \left[\frac{A \cdot \frac{M - (m + p \cdot x) R^2 \omega^2}{B \cdot R} - Q - p \cdot x}{mg + p \cdot x} \right] \cdot g$$

$$V \frac{dV}{dx} = \left[\frac{A \cdot \frac{M}{B \cdot R} - \frac{A \cdot m \cdot R^2 \omega^2}{B \cdot R} - \frac{A \cdot p \cdot x \cdot R^2 \omega^2}{B \cdot R} - Q - p \cdot x}{mg + p \cdot x} \right] \cdot g$$

Введем обозначение $C = A/B$, тогда:

$$V \frac{dV}{dx} = \left[\frac{\frac{C \cdot M - C \cdot m \cdot R^2 \omega^2 - Q \cdot R}{R} - \left(\frac{C \cdot R^2 \omega^2 + R}{R} \right) p \cdot x}{mg + p \cdot x} \right] \cdot g, \text{ или}$$

$$V \frac{dV}{dx} = \frac{(C \cdot M - C \cdot m \cdot R^2 \omega^2 - Q \cdot R)g}{R(mg + p \cdot x)} - \frac{(C \cdot R^2 \omega^2 + R)p \cdot x \cdot g}{R(mg + p \cdot x)}$$

В начальный момент времени :

$$C \cdot (M - m \cdot R^2 \omega^2) = Q \cdot R$$

$M = m \cdot R^2 \omega^2$, то есть нет налипшего на рабочий орган грунта, момент сопротивления равен моменту инерции только рабочего органа, без присоединенной массы грунта, тогда:

$$V \frac{dV}{dx} = \frac{C \cdot R^2 \omega^2 + R}{R(mg + p \cdot x)} p \cdot x \cdot g.$$

Решаем это дифференциальное уравнение :

$$\int V dV = \frac{(C \cdot R^2 \omega^2 + R)p \cdot g}{R} \int \frac{x dx}{mg + p \cdot x}$$

$$\frac{V^2}{2} = \frac{(C \cdot R^2 \omega^2 + R)p \cdot g}{R} \cdot \frac{1}{p^2} [p \cdot x + mg(1 - \ln|p \cdot x + mg|)]$$

$$\frac{V^2}{2} = \frac{(C \cdot R \omega^2 + 1)g}{p} \cdot [p \cdot x + mg(1 - \ln|p \cdot x + mg|)]$$

В результате выражение скорости перемещения рабочего органа имеет вид:

$$V = \sqrt{2 \left(\frac{(C \cdot R \omega^2 + 1)g}{p} \cdot [p \cdot x + mg(1 - \ln|p \cdot x + mg|)] \right)} \quad (2)$$

Это зависимость $V = V(C = A/B, \omega, R, p, x, m)$

В этом выражении:

$\frac{A}{l}$ – удельная сила сопротивления внедрению, Н/м,

A – сила сопротивления внедрению, которая находится по формуле :

$$A = S \cdot l \cdot K_{\sigma}$$

K_{σ} – коэффициент сопротивления грунта внедрению, Н/м²,

$$\frac{B}{l} = F_{рез} \cdot \cos \alpha$$

Силу резания грунта определяем согласно методике, приведенной в работе [7]. Подставляя значение силы резания из [7], получим :

$$B = \left(bh\tau_0 \frac{\cos \beta + 1}{\sin \beta} + \frac{2}{9} b\mu v_0 \left(\sqrt{9h\tau_0 \mu^{-1} v_0^{-1} + 1} + 1 \right) \cdot \frac{3\cos \beta + 1}{\sin \beta} + b(\rho - \rho_e)g \frac{h^2}{2} \right) \cdot l \cdot \cos \alpha$$

где:

μ – вязкость грунта, Пас,

τ – сопротивление грунта сдвигу, Па,

b – ширина резания, в нашем случае режет лопасть, поэтому равна высоте лопасти, м,

β – угол резания, в нашем случае угол, под которым лопасть режет грунт, это угол наклона винтовой лопасти от перпендикуляра к оси шнека, рад,

h – длина перемещения грунта по шнеку (высота ножа в исходной формуле $F_{рез}$), м.

Принимаем допущение на основании предыдущих исследований и наблюдений за процессом разработки донных отложений одну треть от ширины резания:

v_0 – скорость резания единичным ножом, принимаем , м/с

$$v_0 = \omega R_{CL}$$

где:

R_{CL} – радиус середины лопасти, м

Тогда выражение для C в формуле (2) будет иметь вид:

$$C = \frac{S \cdot K_{\sigma}}{\left(bh\tau_0 \frac{\cos \alpha + 1}{\sin \alpha} + \frac{2}{9} b\mu v_0 \left(\sqrt{9h\tau_0 \mu^{-1} v_0^{-1} + 1} + 1 \right) \cdot \frac{3\cos \alpha + 1}{\sin \alpha} + b(\rho - \rho_e)g \frac{h^2}{2} \right) \cdot \cos \alpha}$$

Математическая модель скорости перемещения рабочего органа будет выглядеть так:

$$v = \sqrt[2]{\left(\frac{\left(\frac{S \cdot K_{\sigma}}{\left(bh\tau_0 \frac{\cos \alpha + 1}{\sin \alpha} + \frac{2}{9} b\mu v_0 \left(\sqrt{9h\tau_0 \mu^{-1} v_0^{-1} + 1} + 1 \right) \cdot \frac{3\cos \alpha + 1}{\sin \alpha} + b(\rho - \rho_e)g \frac{h^2}{2} \right) \cdot \cos \alpha} \cdot R\omega^2 + 1 \right) g}{p} \cdot [p \cdot x + mg(1 - \ln|p \cdot x + mg|)] \right)} \quad (3)$$

Определение поправочного коэффициента. Для проектирования рациональных параметров комплекса по добыче донных грунтов необходимо выполнить следующее условие (рисунок 5):

$$\frac{\text{Кол – во подаваемого шнеком донного грунта}}{\text{время}} = \Pi_{III} \quad \text{и} \quad \frac{\text{Кол – во всасываемого патрубком донного грунта}}{\text{время}} = \Pi_B$$

должны быть равны между собой.

На практике количество подаваемого донного грунта не равно количеству всасываемого грунта, поэтому необходимо ввести поправочный коэффициент K_{II} .

Так, $(V_1 - V_2) \cdot \rho_{дон.грунта}$ – это количество, равное массе грунта, и подается в патрубок с поправочным коэффициентом K_{II} . Предположительно $K_{II} < 1$.

$$K_{II} \cdot \Pi_{III} = \Pi_B \quad (4)$$

Поскольку нам известны несколько параметров в выражении (3), то, решая совместно (3) и (4), можно найти K_{II} .

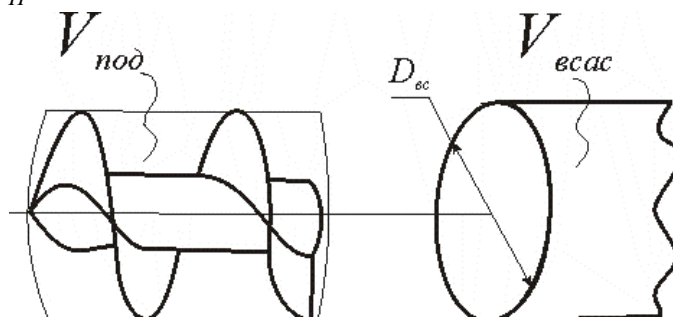


Рисунок 5 – К определению поправочного коэффициента

Располагая данными всасывающего комплекса : $\Pi_2 = 250 \text{ м}^3/\text{час}$, $\omega = 30 \dots 50 \text{ об/мин}$, $D_{вс} = 0,22 \dots 0,273 \text{ м}$ и подставив эти данные в выражение (3), можно определить размеры, рациональные обороты, скорость подачи шнекового рыхлителя для разных типов донных грунтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. – М.: Машиностроение, 1971. – 357 с.
2. Огородников, С.П. Гидромеханизация разработки грунтов / С.П. Огородников. – М.: Стройиздат, 1986. – 253 с.
3. Сметанин, В.И. Восстановление и очистка водных объектов : учеб. пособие / В.И.Сметанин. – М.: Колос, 2003. – 159 с.: ил.
4. Согин, А.В. Средства гидромеханизации для очистки водных объектов от донных отложений: дисс. ... док. тех. наук / А.В.Согин. – М., 2011. – 360 с.
5. Шапкин, В.А. Постановка задачи фрезерования сапропелевых отложений / В.А.Шапкин, А.В.Согин, Л.Т.Крюков // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «АВТО НН 2009». – Н.Новгород: НГТУ, 2009. – С.135-136.
6. Шапкин, В.А. Рекомендуемые конструктивные параметры машин со шнековым двигателем / В.А.Шапкин, И.А.Согин // Сб. материалов 71-й международной научно-технической конференции «Безопасность транспортных средств в эксплуатации». – Н.Новгород: НГТУ, 2010. – С.14-25.
7. Штин, С.М. Озерные сапропели и их комплексное освоение / С.М. Штин; под ред. И.М.Ялганца ; Моск. гос. гор. ун-т. – М.: МГГУ, 2005. – 373 с.: ил.

©Китов А.Г., Согин И.А., Шапкин В.А., 2013