

УДК 621.928.37+621.928.93

Д. И. Мисюля, кандидат технических наук, ассистент (БГТУ); В. В. Кузьмин, кандидат технических наук, доцент (БГТУ); В. А. Марков, доктор технических наук, профессор (БГТУ)

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАСКРУЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В ЦИКЛОНАХ

В статье представлено технико-экономическое обоснование применения разработанных конструкций раскручивающих устройств в циклонных аппаратах: лопастного раскручивателя и раскручивающего устройства с рециркуляцией потока, позволяющих существенно снизить гидравлическое сопротивление и повысить эффективность улавливания дисперсных частиц. Приведены расчеты экономии энергии и денежных средств при очистке газа в циклонах с разработанными раскручивающими устройствами. При использовании в наиболее распространенных циклонах ЦН-11 и ЦН-15 лопастного раскручивателя энергетические затраты на очистку 1000 м^3 газа снижаются в среднем на 0,25 и 0,15 кВт·ч, а при использовании раскручивающего устройства с рециркуляцией потока – на 0,2 и 0,11 кВт·ч соответственно. Срок окупаемости дополнительных затрат на раскручивающее устройство составит менее года.

The article presented a feasibility study of application of the developed constructions of untwisting devices in cyclone apparatus: blade untwisting device and the untwisting device with stream recirculation, allowing substantially to reduce pressure drop and promote efficiency of catching of dispersible particles. The calculations of economy of energy and money facilities are resulted at cleaning of gas in cyclones with the developed untwisting devices. Application in the most widespread cyclones CN-11 and CN-15 blade untwisting device power inputs on clearing 1000 м^3 gas decrease on the average on 0,25 and 0,15 kW·h, and using of the untwisting device with recirculation of a stream – on 0,2 and 0,11 kW·h accordingly. The term of recoupment of additional expenses on an untwisting device will make less than year.

Введение. Экологические проблемы, обусловленные выбросами в атмосферу загрязненных газовых потоков, постепенно обостряются в связи с ростом промышленного производства и степени загрязнения воздушного бассейна. Решение экологических проблем энергоемких производств связано с проведением активной энергосберегающей политики, внедрением энергоэкономичных технологий, совершенных средств и устройств по очистке газовых выбросов.

В настоящее время наиболее распространенным видом сухих пылеуловителей в системах газоочистки и вентиляции являются циклоны, и в данной области имеются существенные возможности для энергосбережения [1].

Энергетические затраты в циклоне обусловлены различными факторами. Значительная их часть связана с вращательным движением газа и потерей кинетической энергии выходящего вихревого потока. Поэтому если уменьшить интенсивность вращения выходящего из аппарата потока с помощью раскручивающего устройства, позволяющего преобразовать кинетическую энергию вращательного движения в потенциальную энергию статического давления, то можно существенно снизить гидравлическое сопротивление циклона.

Учитывая, что энергосбережение является приоритетным направлением фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь, снижение потерь энергии при циклонной очистке газов является актуальной задачей.

Основная часть. На кафедре процессов и аппаратов химических производств Белорусского государственного технологического университета разработаны две новые конструкции раскручивающих устройств: лопастной раскручиватель и раскручивающее устройство с рециркуляцией потока, представленные на рис. 1.

Лопастной раскручиватель (рис. 1, а), располагаемый в выхлопной трубе циклона, состоит из цилиндрической части (сердечника) *I* с прикрепленными к ней радиальными, изогнутыми по направлению вращения газового потока лопастями *2* и конуса *3*. Профиль лопастей *2* соответствует дуге окружности (в соответствии со средней линией профиля лопастей осевых вентиляторов [2, 3]) радиусом $r_{л}$. Угол наклона передней кромки лопастей α определяется аэродинамикой газового потока в выхлопной трубе, а задней кромки – соответствует осевому движению газа.

Принцип работы разработанного лопастного раскручивателя следующий: очищенный газ в виде вихревого потока поступает в выхлопную трубу и попадает на лопасти *2* раскручивателя, на которых происходит его плавное равномерное спрямление. Благодаря конусу *3* обеспечивается постепенное расширение раскрученного газового потока на все сечение выхлопной трубы. Сердечник *I* предназначен для ликвидации осевого обратного тока.

Раскручивающее устройство с рециркуляцией потока (рис. 1, б) состоит из полой цилиндрической части (сердечника) *I* с прикреплен-

ными к ней радиальными, изогнутыми по направлению вращения газового потока, полыми лопастями 2 со щелевыми отверстиями 6, конуса 3 и циркуляционной трубы 4, на нижнем конце которой установлен статический завихритель 5, осуществляющий закрутку газа в направлении вращения потока в циклоне.

Принцип работы раскручивающего устройства с рециркуляцией потока следующий: восходящий вихревой поток поступает в выхлопную трубу и попадает на лопасти 2 раскручивателя, на которых происходит его плавное равномерное спрямление. Частицы, захваченные этим восходящим потоком, движутся вдоль

внутренней поверхности выхлопной трубы. Через щелевые отверстия 6 и полости лопастей 2 они поступают с частью потока внутрь сердечника 1 и по циркуляционной трубе 4 направляются в бункер уловленной пыли. Для интенсификации процесса разделения циркулирующего пылегазового потока на выходе из циркуляционной трубы 4 служит завихритель 5. Благодаря конусу 3 обеспечивается постепенное расширение раскрученного газового потока на все сечение трубы.

Параметры лопастного раскручивателя и раскручивающего устройства с рециркуляцией потока представлены в табл. 1.

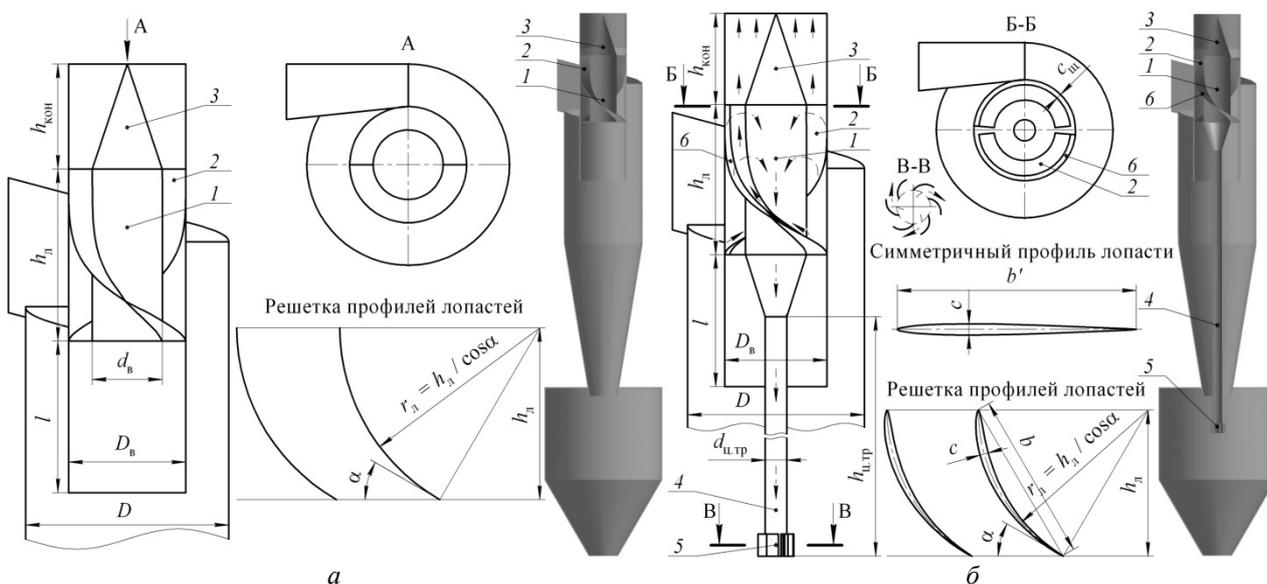


Рис. 1. Циклоны с раскручивающими устройствами:

a – с лопастным раскручивателем; *б* – с раскручивающим устройством с рециркуляцией потока:

1 – цилиндрическая часть (сердечник); 2 – лопасти; 3 – конус;

4 – циркуляционная труба; 5 – завихритель; 6 – щелевое отверстие;

b , b' , c , $r_{\text{л}}$ – хорда, длина средней линии, максимальная толщина и радиус кривизны профиля лопасти соответственно; $c_{\text{щ}}$ – ширина щели; D , $D_{\text{в}}$, $d_{\text{в}}$, $d_{\text{ц.тр}}$ – диаметр циклона, выхлопной трубы, сердечника и циркуляционной трубы соответственно; $h_{\text{л}}$, $h_{\text{кон}}$, $h_{\text{ц.тр}}$ – высота лопастей, конуса и циркуляционной трубы соответственно; l – высота установки раскручивателя; α – угол наклона передней кромки лопастей

Таблица 1

Параметры раскручивающих устройств для циклонных аппаратов

Параметры	Лопастной раскручиватель		Раскручивающее устройство с рециркуляцией потока	
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-11	ЦН-15
Диаметр сердечника $d_{\text{в}}$	$(0,37-0,41)D$	$(0,32-0,38)D$	$(0,37-0,41)D$	$(0,32-0,38)D$
Число лопастей n	2			
Высота лопастей $h_{\text{л}}$	0,87D			
Угол наклона передней кромки лопастей α	30°			
Высота конуса $h_{\text{кон}}$	1,5 $d_{\text{в}}$			
Высота установки в выхлопной трубе l	1,12D	0,77D	1,12D	0,77D
Ширина щели на передней стороне лопасти $c_{\text{щ}}$	–		0,026D	
Внутренний диаметр циркуляционной трубы $d_{\text{ц.тр}}$	–		0,12D	
Высота циркуляционной трубы $h_{\text{ц.тр}}$	–		4D	3,7D

Исследования гидравлического сопротивления и эффективности циклонов ЦН-11 и ЦН-15, снабженных раскручивающими устройствами, проводились в соответствии с описанными в работе [4] методиками.

В качестве экспериментальной пыли использовался молотый керамический кирпич (СТБ 1160–99), дисперсный состав которого определялся методом лазерной дифракции с помощью лазерного анализатора размеров частиц Analizette 22 MicroTec Fritsch GmbH (Германия). Медианный диаметр частиц молотого керамического кирпича был равен $d_m = (15,6 \pm 0,1)$ мкм.

Гидравлическое сопротивление циклонов ЦН-11 и ЦН-15 с раскручивающими устройствами и без них, а также рассчитанное по данным НИИОГАЗ приведено на рис. 2. Анализ представленных на данном рисунке зависимостей показывает, что разница рассчитанных по данным НИИОГАЗ [5–7] и определенных экспериментально значений для циклонов ЦН-11 и ЦН-15 не превышает 1,5–3,0% и 2,5–5,5% соответственно. При этом коэффициент гидравлического сопротивления экспериментальных циклонов ЦН-11 и ЦН-15 в диапазоне условных скоростей газа $w_{ц} = 2,5–4,0$ м/с равен $\zeta = 231–235$ и $\zeta = 140–145$, т. е. его значения изменялись незначительно (не превышали 2–3%).

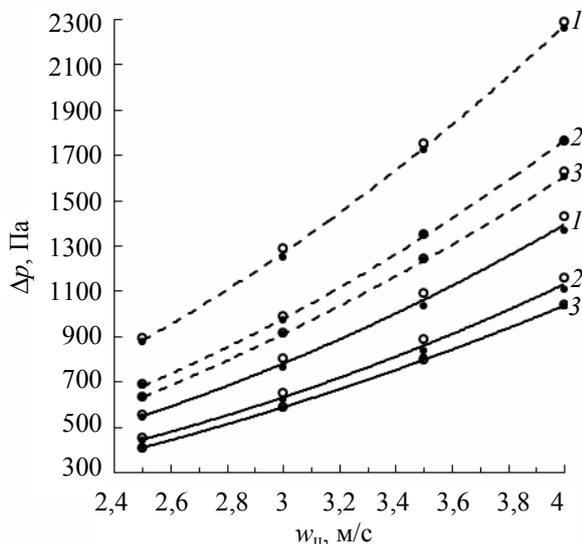


Рис. 2. Гидравлическое сопротивление циклонов ЦН-11 (---) и ЦН-15 (—):
 ○ – по расчетным данным;
 ● – по экспериментальным данным;
 1 – без раскручивающего устройства;
 2 – с раскручивающим устройством с рециркуляцией потока (см. рис. 1, б);
 3 – с лопастным раскручителем (см. рис. 1, а)

Применение лопастного раскручителя позволяет снизить гидравлическое сопротивление

наиболее распространенных циклонов ЦН-11 и ЦН-15 на 28–30% и 26,0–27,5% соответственно, при этом эффективность очистки газов в них остается на прежнем уровне [8, 9].

Использование раскручивающего устройства с рециркуляцией потока позволяет снизить потери давления в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 в среднем на 23 и 19% и повысить степень очистки – унос пыли уменьшается на 10–17% и 7–12% соответственно (рис. 3).

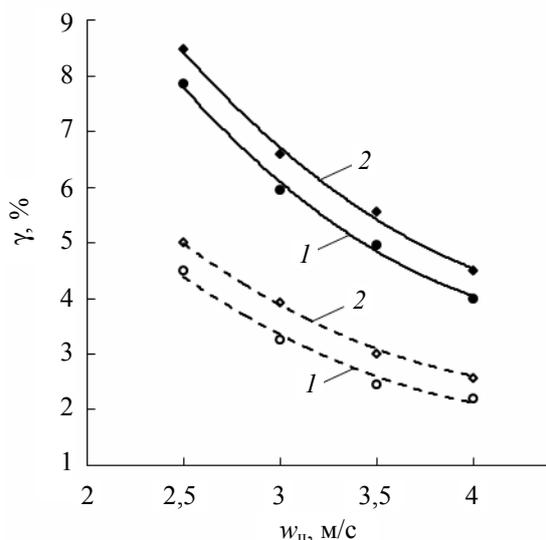


Рис. 3. Влияние раскручивающего устройства на коэффициент уноса γ , % частиц молотого керамического кирпича в циклонах ЦН-11 (---) и ЦН-15 (—):
 1 – с раскручивающим устройством с рециркуляцией потока;
 2 – с лопастным раскручителем и без раскручителя

Оценим экономию энергии и денежных средств при проведении процессов очистки газа в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 с разработанным лопастным раскручителем.

Энергетические затраты в циклоне определяются его гидравлическим сопротивлением. Мощность, затрачиваемая на очистку газа в циклонном аппарате, рассчитывается по формуле [10]:

$$N_{п} = \frac{Q \Delta p}{1000 \eta_{в.а}},$$

где Q – производительность циклона, м³/с; $\eta_{в.а}$ – коэффициент полезного действия (КПД) вентиляторного агрегата, определяемый по уравнению

$$\eta_{в.а} = \eta_{дв} \eta_{пер} \eta_{в},$$

где $\eta_{дв}$, $\eta_{пер}$, $\eta_{в}$ – КПД электродвигателя, передачи и вентилятора соответственно.

Энергетические затраты на очистку 1000 м³ газа в циклоне вычисляются по формуле

$$N_{уд} = \frac{\Delta p}{3600\eta_{в.а}}$$

Годовое потребление электроэнергии зависит от графика работы циклона (одно-, двух- или трехсменный) и определяется по выражению

$$N_r = N_n \tau_r,$$

где τ_r – время работы в году, ч.

Годовая экономия электроэнергии N_3 , кВт·ч, определяется разностью между годовым потреблением электроэнергии при очистке газа в циклонах без раскручивателя и с раскручивающим устройством.

Потребители производят оплату электрической энергии по тарифам введенной в действие с 1 сентября 2011 г. декларации об уровне тарифов на электрическую энергию, отпускаемую республиканскими унитарными предприятиями электроэнергетики ГПО «Белэнерго» для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, проиндексированным согласно порядку, изложенному в постановлении Министерства экономики от 28 февраля 2011 г. № 24, с учетом изменений и дополнений к нему. Энергоснабжающие организации оформляют платежные документы по оплате за энергию по тарифам данной декларации, проиндексированным на изменение курса денежной единицы Республики Беларусь по отношению к доллару США на день оформления платежного документа и день оплаты, согласно формуле [11]:

$$T_n = T_6 \left(0,11 + 0,89 \frac{K_n}{K_6} \right),$$

где T_n , T_6 – тариф на электроэнергию, проиндексированный на изменение курса белорусского рубля к доллару США на день оформления платежного документа и день оплаты и установленный декларацией соответственно ($T_6 = 737,7$ руб./кВт·ч) – для промышленных и приравненных к ним потребителей с присоединенной мощностью до 750 кВА); K_n , K_6 –

значение курса белорусского рубля по отношению к доллару США на день оформления платежного документа и день оплаты и при установлении тарифов на электроэнергию соответственно ($K_6 = 5107$ руб.).

Тарифы декларации установлены без налога на добавленную стоимость.

При значении курса белорусского рубля по отношению к доллару США $K_n = 8660$ руб. (на 23.10.2011 г.) стоимость 1 кВт·ч электроэнергии для промышленных и приравненных к ним потребителей с присоединенной мощностью до 750 кВА составит

$$T_n = 737,7 \cdot \left(0,11 + 0,89 \cdot \frac{8660}{5107} \right) = 1195 \text{ руб.}$$

Годовая экономия денежных средств за счет снижения потребления электроэнергии при использовании раскручивающего устройства составит

$$\Xi = N_3 T_n.$$

Расчет проведем для наиболее распространенных циклонов ЦН-11 и ЦН-15 средней производительности $Q = 1,76 \text{ м}^3/\text{с}$ (для оптимального режима работы, характеризуемого условной скоростью газового потока 3,5 м/с, диаметр циклонов будет равен $D = 0,8 \text{ м}$) при непрерывной работе циклона в году $\tau_r = 8760 \text{ ч}$ [1]. КПД вентиляторного агрегата примем равным $\eta_{в.а} = 0,6$. Результаты расчета сведены в табл. 2.

Стоимость всех видов оборудования исчисляется по ценам действующих прейскурантов на оборудование. В случае применения оригинального оборудования, отсутствующего в прейскурантах, допускается исчислять его стоимость по аналогии с родственными видами оборудования [12]. В связи с этим стоимость раскручивающего устройства может быть определена исходя из стоимости циклонов типа ЦН с учетом их материалоемкости. Цены на циклоны без раскручивающих устройств, приведенные в табл. 2, определены по прайс-листам наиболее известных белорусских производителей и усреднены.

Таблица 2

Результаты расчета энергозатрат на очистку газа в циклонах ЦН-11 и ЦН-15

Параметры	Без раскручивающего устройства		С лопастным раскручивателем		С раскручивающим устройством с рециркуляцией	
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-11	ЦН-15
Потребляемая мощность N_n , кВт	5,388	3,513	3,825	2,564	4,149	2,845
Энергозатраты на очистку 1000 м ³ газа $N_{уд}$, кВт·ч	0,851	0,555	0,604	0,405	0,655	0,45
Годовое потребление электроэнергии N_r , кВт·ч	47 197	30 773	33 510	22 464	36 342	24 926
Годовая экономия электроэнергии N_3 , кВт·ч	–	–	13 687	8 309	10 855	5 847
Годовая экономия денежных средств за счет снижения потребления электроэнергии Ξ , млн. руб.	–	–	16,36	9,93	12,97	6,99
Масса, кг	733	738	786	774	814	801
Стоимость, млн. руб.	29	25	32	27,5	33,5	29

Как видно из табл. 2, при использовании в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 лопастного раскручивателя энергозатраты на очистку 1000 м^3 газа снижаются в среднем на 0,25 и 0,15 кВт·ч, а при использовании раскручивающего устройства с рециркуляцией потока – на 0,2 и 0,11 кВт·ч соответственно. Применение лопастного раскручивателя в указанных аппаратах диаметром $D = 0,8 \text{ м}$ при оптимальном режиме работы позволит получить годовую экономию электроэнергии 13,7 и 8,3 МВт·ч, что при стоимости 1 кВт·ч электроэнергии 1195 руб. составит 16,36 и 9,93 млн. руб. соответственно. Использование лопастного раскручивающего устройства с рециркуляцией потока приведет к несколько меньшей годовой экономии денежных средств за счет снижения потребления электроэнергии (12,97 и 6,99 млн. руб. соответственно), однако вследствие большей эффективности очистки, учитывая стоимость уловленной пыли и экологический фактор, общая экономия денежных средств может быть выше. В то же время снижение гидравлического сопротивления, а следовательно и сети, позволит использовать вентилятор с меньшим создаваемым давлением и, соответственно, мощностью двигателя, что даст дополнительный эффект в виде экономии на стоимости вентилятора. Дополнительные затраты, определяемые как разность между стоимостью циклонов с раскручивающим устройством и без раскручивателя, окупятся менее чем за год.

Заключение. На основании вышеотмеченного можно сделать следующий вывод. Применение в наиболее распространенных циклонных пылеуловителях разработанных лопастного раскручивателя и раскручивающего устройства с рециркуляцией потока позволит снизить энергетические затраты на очистку 1000 м^3 газа на 0,11–0,25 кВт·ч. При этом срок окупаемости дополнительных затрат на раскручивающее устройство не превысит одного года, что существенно меньше среднего срока окупаемости мероприятий по энергосбережению для Республики Беларусь в настоящее время.

Учитывая, что на одном предприятии, как правило, используется несколько или десятки циклонов и стоимость электроэнергии постоянно повышается, то станет очевидной целесообразность применения разработанных раскручивающих устройств.

Литература

1. Кузьмин, В. В. Снижение энергетических и экономических затрат при использовании циклонов НИИОГАЗ / В. В. Кузьмин, Д. И. Ми-

сюля, В. А. Марков // Энергоэффективность. – 2011. – № 2. – С. 14–16.

2. Брусиловский, И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов / И. В. Брусиловский. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.

3. Черкасский, В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: учебник для теплоэнергетических специальностей вузов / В. М. Черкасский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.

4. Мисюля, Д. И. Применение лопастного раскручивателя в циклонных пылеуловителях / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Труды БГТУ. – 2011. – № 3: Химия и технология неорган. в-в. – С. 162–169.

5. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации / под науч. ред. В. Н. Ужова. – Ярославль: Верх.-Волж. книж. изд-во, 1970. – 95 с.

6. Лазарев, В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители: справочник / В. А. Лазарев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: Фирма ОЗОН-НН, 2006. – 320 с.

7. Ладыгичев, М. Г. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: справ. изд. / М. Г. Ладыгичев, Г. Я. Бернер. – М.: Теплотехник, 2004. – 694 с.

8. Мисюля, Д. И. Влияние раскручивающего устройства на эффективность очистки в циклонах / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Промышленная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 37–39.

9. Мисюля, Д. И. Новая конструкция лопастного раскручивателя циклонного аппарата / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2010. – № 5. – С. 57–60.

10. Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т. / ред. совет: К. В. Фролов (пред.) [и др.]. – М.: Машиностроение. – Т. IV–12: Машины и аппараты химических и нефтехимических производств / М. Б. Генералов [и др.]; под общ. ред. М. Б. Генералова. – 2004. – 832 с.

11. РУП «Гомельэнерго» – Информация потребителю / Тарифы для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gomelenergo.by/inf4u.htm#t_url1. – Дата доступа: 23.10.2011.

12. Альперт, Л. З. Основы проектирования химических установок: учеб. пособие для учащихся химико-механических специальностей техникумов / Л. З. Альперт. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 304 с.

Поступила 01.03.2012