

УДК 621.771.23

Василев Я. Д.
Самокиш Д. Н.
Замогильный Р. А.
Кожухарь А. Г.
Кочаткова С. В.

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И ОТНОСИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ ПОЛОСЫ НА МОЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ С НАТЯЖЕНИЕМ

Холодная прокатка является одним из наиболее энергоемких процессов пластической деформации. Из теории и практики листопрокатного производства известно, что с уменьшением толщины и с увеличением степени наклепа полосы удельный расход энергии при холодной прокатке увеличивается. Например, удельный расход электрической энергии при холодной прокатке автомобильного листа, тонкой жести и особо тонких полос из легированных сталей достигает соответственно 60–80, 200–250, 300–500 кВт·ч на тонну продукции и более [1, 2]. Поэтому изыскание возможностей для повышения энергетической эффективности процесса холодной прокатки актуально.

Отличительной особенностью холодной полосовой прокатки является то, что пластическая деформация металла валками осуществляется с натяжением. В настоящее время установлено, что натяжение при холодной прокатке обеспечивает значительное уменьшение уровня контактных напряжений и силы прокатки, повышает продольную и поперечную устойчивость полосы, способствует выравниванию неравномерности деформации и сглаживанию неплоскостности полосы, а также уменьшению длины очага деформации и соответственно контактной поверхности металла с инструментом.

В современной литературе по теории и технологии прокатного производства установлено, что натяжение оказывает существенное влияние и на уровень потребляемой мощности при холодной прокатке [3–5]. В работах опубликованных ранее отмечается, что натяжение оказывает незначительное влияние на мощность прокатки [6]. Такие разночтения объясняются, прежде всего, тем, что влияние натяжения на мощность процесса холодной прокатки исследовано недостаточно.

В работе [5] было теоретически установлено, что прокатка тонких полос с натяжением является энергетически более выгодным процессом, чем прокатка без натяжения. Применение натяжения при прокатке тонких полос, прежде всего холодной, способствуя уменьшению уровня контактных напряжений и, как следствие, длины очага деформации (контактной поверхности полосы с валками), приводит к уменьшению силы, момента и мощности прокатки. Это вытекает из анализа выражения для определения относительного изменения мощности при холодной полосовой прокатке с натяжением по сравнению с прокаткой без натяжения, полученного с использованием уравнения баланса мощностей [5]:

$$\frac{W_{сн}}{W_c} = \left\{ \frac{p_{срсн} \psi_{сн} \left(\frac{l_{сн}}{l_c} \right)^2}{p_{срс} \psi_c \left(\frac{l_c}{l_c} \right)} + \frac{Rh_0}{2p_{срс}\psi_c l_c^2} [q_0 \varepsilon + S_{сн} (1 - \varepsilon)(q_1 - q_0)] \right\} \frac{(1 + S_c)}{(1 + S_{сн})}, \quad (1)$$

где $p_{срсн}$, $\psi_{сн}$, $l_{сн}$, $S_{сн}$, $p_{срс}$, ψ_c , l_c , S_c – среднее контактное нормальное напряжение, коэффициент, характеризующий положение точки приложения равнодействующей контактных сил (коэффициент плеча момента), длина очага деформации и опережение при прокатке с натяжением и без натяжения, рассчитанные с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы; R , h_0 , ε – радиус рабочих валков, толщина полосы на входе в очаг деформации и частное относительное обжатие полосы; q_0 , q_1 – заднее и переднее удельное натяжение. В работе [5] также было теоретически установлено, что при холодной прокатке с натяжением

отношение $W_{сн}/W_c$ (где $W_{сн}$, W_c – суммарная мощность при прокатке с натяжением и мощность при прокатке без натяжения, рассчитанные с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы) всегда меньше единицы. Это говорит о том, что холодная прокатка с натяжением является энергетически более выгодным процессом, чем прокатка без натяжения.

Справедливость выражения (1) была подтверждена экспериментально. Исследования, выполненные на пятиклетевом стане бесконечной холодной прокатки 2030 ОАО «НЛМК» (Российская Федерация), показали, что увеличение относительных удельных натяжений с $(0,15-0,17) \sigma_T$ (где σ_T – предел текучести материала полосы) до $(0,27-0,33) \sigma_T$ позволило уменьшить удельный расход электрической энергии на 3–6 % [3, 4]. Из изложенного следует, что исследования, направленные на установление количественного влияния параметров технологии на мощность процесса холодной прокатки с натяжением являются актуальными, поскольку использование полученных данных необходимо для оптимизации режимов натяжений на станах холодной прокатки с целью минимизации уровня потребляемой мощности.

Целью настоящей работы является получение количественных данных о влиянии толщины, предварительного и частного относительного обжатия полосы на мощность процесса холодной прокатки с натяжением.

Данные о влиянии толщины, предварительного и частного относительного обжатия полосы на мощность при холодной прокатке с натяжением получали методом математического моделирования. В основу исследования была положена зависимость (1), позволяющая определить относительное изменение мощности при холодной прокатке с натяжением в сравнении с прокаткой без натяжения. Для реализации поставленной цели была использована математическая модель процесса холодной прокатки, учитывающая влияние деформационных параметров процесса, упрочнения материала полосы, упругих деформаций валков и полосы, коэффициента трения и натяжения, приведенная в работах [5, 7]. Величину среднего коэффициента натяжения $\xi_{ср}$ при холодной прокатке определяли по уточненной модели, учитывающей особенности реализации процесса с большим градиентом удельных натяжений [8]:

$$\xi_{ср} = \xi_0 + (\xi_1 - \xi_0) \left(\frac{\gamma_c}{\alpha_c} + \frac{x_1}{l_c} \right), \quad (2)$$

где
$$\xi_0 = 1 - \frac{q_0}{\beta \sigma_{T0}}; \quad (3)$$

$$\xi_1 = 1 - \frac{q_1}{\beta \sigma_{T1}}; \quad (4)$$

q_0 , q_1 – заднее и переднее удельное натяжения; σ_{T0} , σ_{T1} – предел текучести материала полосы на входе и выходе из очага деформации; l_c , γ_c , α_c – длина очага деформации, нейтральный угол и угол контакта полосы с валком при прокатке с натяжением, рассчитанные с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы; β , x_1 – коэффициент Лодэ и приращение длины очага деформации за линией, соединяющей центры валков, вызванное упругим сжатием валков и упругим восстановлением полосы.

Моделировали условия холодной прокатки полос толщиной из стали 08кп, упрочнение стали определяли в соответствии с уравнением $[\sigma_{Tc} = 230 + 34,6(100\varepsilon_{\Sigma})^{0,6}]$. В ходе моделирования изменяли значения предварительного и частного относительного обжатия, коэффициента трения и относительных удельных натяжений соответственно в пределах: $\varepsilon_{np} = 0-0,9$; $\varepsilon = 0,1-0,4$; $f = 0,04-0,06$ и $q_0/\beta\sigma_{T0} = q_1/\beta\sigma_{T1} = 0-0,5$. При этом моделировали условия прокатки с одним передним ($q_0/\beta\sigma_{T0} = 0$; $q_1/\beta\sigma_{T1} \neq 0$), задним ($q_1/\beta\sigma_{T1} = 0$; $q_0/\beta\sigma_{T0} \neq 0$) и двумя одинаковыми удельными натяжениями ($q_0/\beta\sigma_{T0} = q_1/\beta\sigma_{T1} \neq 0$). По полученным данным строили зависимость $W_{сн}/W_c = \varphi(q_0/\beta\sigma_{T0}; q_1/\beta\sigma_{T1})$. Часть полученных данных, которые соответствуют условиям прокатки на действующих непрерывных станах (реверсивных) станах представлены на рис. 1–3.

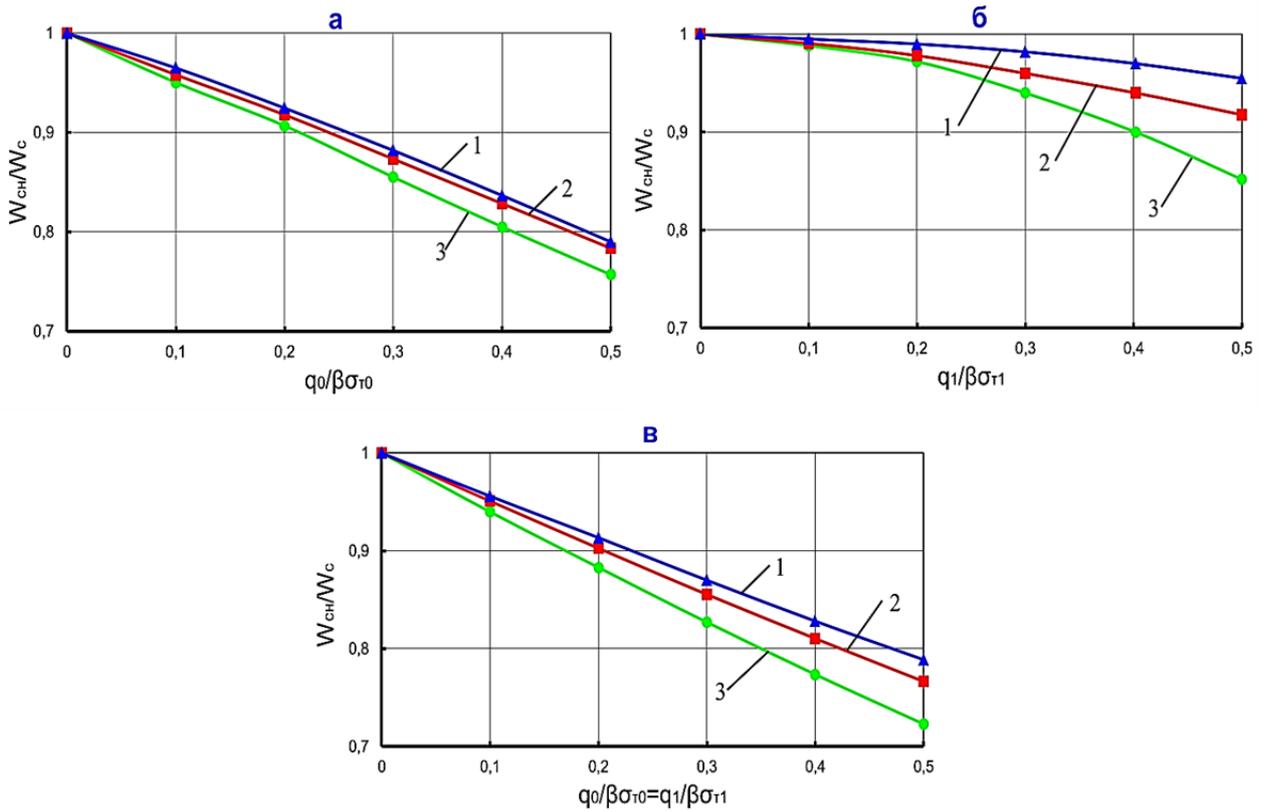


Рис. 1. Влияние начальной толщины полосы на мощность процесса холодной полосовой прокатки с натяжением (сталь 08кп; $R = 300$ мм; $\varepsilon_{np} = 0$; $\varepsilon = 0,3$; $f = 0,06$):

а – при $q_1/\beta\sigma_{T1} = 0$; б – при $q_0/\beta\sigma_{T0} = 0$; в – при $q_1/\beta\sigma_{T1} = q_0/\beta\sigma_{T0}$; 1 – $h_0 = 2$ мм; 2 – $h_0 = 1$ мм; 3 – $h_0 = 0,5$ мм

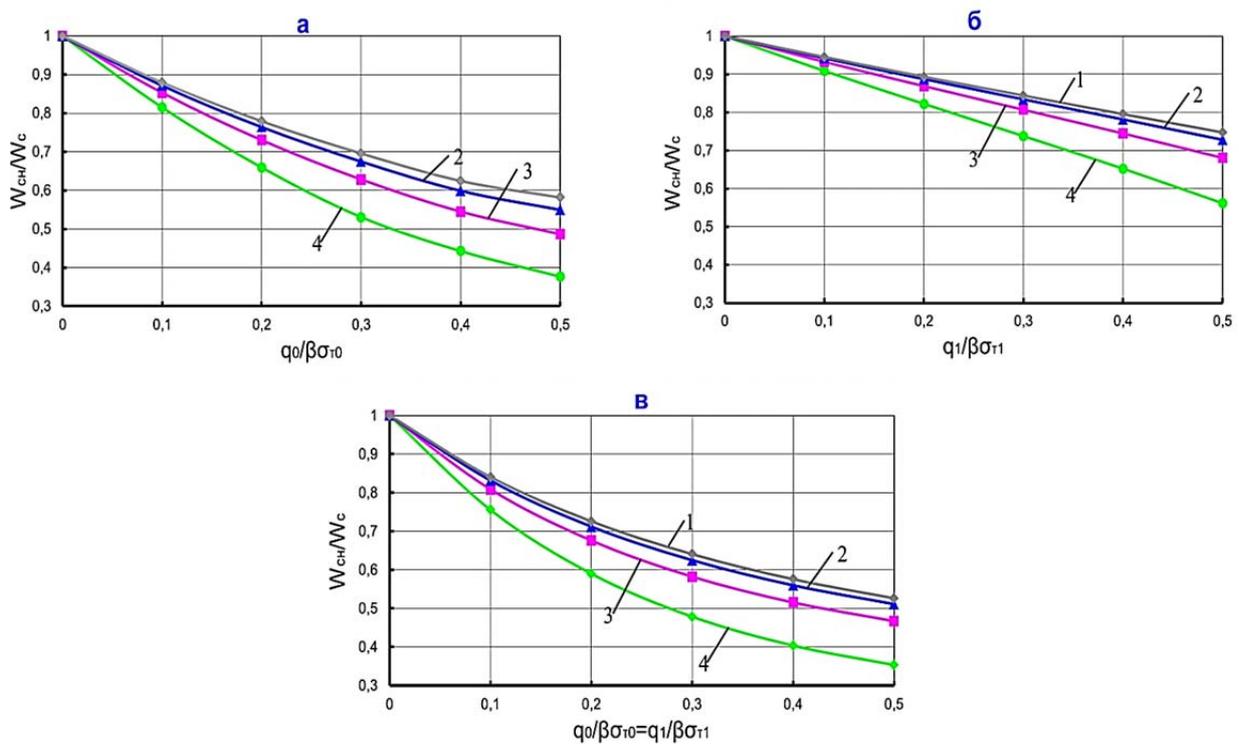


Рис. 2. Влияние частного относительного обжатия на мощность процесса холодной полосовой прокатки с натяжением (сталь 08кп, $R = 300$ мм; $h_0 = 0,25$ мм; $\varepsilon_{np} = 0,9$; $f = 0,04$):

а – при $q_1/\beta\sigma_{T1} = 0$; б – при $q_0/\beta\sigma_{T0} = 0$; в – при $q_1/\beta\sigma_{T1} = q_0/\beta\sigma_{T0}$; 1 – $\varepsilon = 0,4$; 2 – $\varepsilon = 0,3$; 3 – $\varepsilon = 0,2$; 4 – $\varepsilon = 0,1$

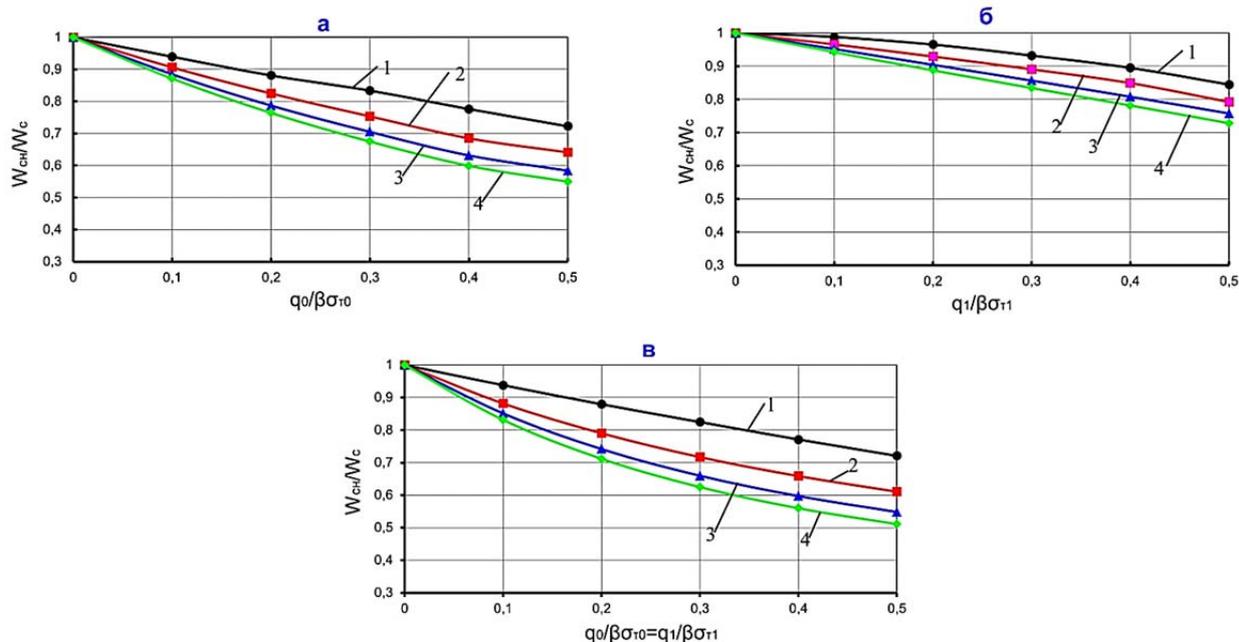


Рис. 3. Влияние степени предварительной деформации на мощность процесса холодной полосовой прокатки с натяжением (сталь 08кп; $R = 300$ мм; $h_0 = 0,25$ мм; $\varepsilon = 0,3$; $f = 0,04$):

а – при $q_1/\beta\sigma_{T1} = 0$; б – при $q_0/\beta\sigma_{T0} = 0$; в – при $q_1/\beta\sigma_{T1} = q_0/\beta\sigma_{T0}$; 1 – $\varepsilon_{np} = 0$; 2 – $\varepsilon_{np} = 0,5$; 3 – $\varepsilon_{np} = 0,75$; 4 – $\varepsilon_{np} = 0,9$

Анализ полученных данных позволяет отметить следующее:

1) Все зависимости $W_{ch}/W_c = \varphi(q_0/\beta\sigma_{T0}; q_1/\beta\sigma_{T1})$ имеют одинаковый качественный характер изменения, свидетельствующий о том, что при холодной прокатке потребляемая мощность с увеличением относительного удельного натяжения уменьшается не зависимо от толщины полосы h_0 , частного ε и предварительного ε_{np} обжатия. Эти зависимости отличаются между собой только количественно. При этом установлено, что прокатка с одним задним удельным натяжением является энергетически более выгодным процессом, чем прокатка с аналогичным передним натяжением. Наибольшее уменьшение потребляемой мощности имеет место при прокатке с двумя одинаковыми относительными натяжениями. При $q_0/\beta\sigma_{T0} = q_1/\beta\sigma_{T1} = 0,4-0,5$ (рис. 1–3, в) уменьшение потребляемой мощности по сравнению с прокаткой без натяжения в зависимости от условий холодной прокатки достигает 10–50 %.

2) Установлено, что с уменьшением толщины прокатываемой полосы и с увеличением относительного удельного натяжения энергетическая эффективность процесса увеличивается и при прокатке полос толщиной 0,5–2 мм с относительными натяжениями $q_0/\beta\sigma_{T0} = q_1/\beta\sigma_{T1} = 0,5$ составляет 5–25 % (рис. 1, в). Это свидетельствует о том, что толщина в исследованном диапазоне толщин полос не относится к числу факторов влияющих существенно на уменьшение мощности при прокатке с натяжением. Однако следует оговориться, что при дальнейшем уменьшении толщины прокатываемой полосы (< 0,3–0,5 мм) энергетическая эффективность процесса увеличивается.

3) С уменьшением частного и с увеличением степени предварительного обжатия (рис. 2–3) мощность прокатки с натяжением снижается. Это означает, что прокатка с большими относительными удельными натяжениями тонких наклепанных полос с малыми частными обжатиями является энергетически более выгодной. Например, при $\varepsilon = 0,1-0,2$ (рис. 2, кривые 3, 4) относительное снижение мощности при прокатке с натяжением составит 30–60%.

4) Выявлено, что прокатка с одним задним относительным натяжением (рис. 1–3, а) по своей энергетической эффективности незначительно отличается от прокатки с двумя одинаковыми относительными натяжениями (рис. 1–3, в). Поэтому предпочтение следует отдавать режимам, где превалирует заднее относительное натяжение, поскольку в этом случае энергетическая эффективность процесса повысится.

Обобщая результаты выполненного моделирования можно отметить, что уменьшение мощности при прокатке с натяжением является следствием уменьшения мощности расходуемой на преодоление сил контактного трения в результате уменьшения уровня контактных напряжений и длины очага деформации (контактной поверхности).

Из изложенного следует, что ведение процесса холодной прокатки на действующих станах с более высокими относительными удельными натяжениями целесообразно. При повышении точности и качества исходного подката и предотвращения условий обрывности полосы создаются благоприятные условия для увеличения относительных удельных натяжения с $(0,15-0,35)q$ до $(0,25-0,5)q$, что позволит снизить потребляемую мощность при холодной прокатке на 3–10 %.

ВЫВОДЫ

Методом математического моделирования получены количественные данные о влиянии основных параметров технологии на относительное изменение мощности при холодной прокатке с натяжением. Установлено, что с увеличением относительного удельного натяжения мощность, необходимая для осуществления процесса, уменьшается и, по сравнению с прокаткой без натяжения в зависимости от условий деформации, может достигать 10–50 %.

Исследовано влияние толщины h_0 , частного ε и предварительного ε_{np} относительного обжатия полосы на мощность холодной прокатки с натяжением. Показано, что энергетически более эффективной является прокатка с натяжением более тонких, предварительно наклепанных полос с малыми частными относительными обжатиями.

Установлено, что холодная прокатка тонких предварительно наклепанных полос с одним задним натяжением по своей эффективности близка к прокатке с двумя одинаковыми натяжениями. Поэтому холодную прокатку тонких полос на действующих станах целесообразно осуществлять с преобладающим задним натяжением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василев Я. Д. *Производство полосовой и листовой стали* / Я. Д. Василев, М. М. Сафьян. – Киев : Вища школа, 1976. – 192 с.
2. Василев Я. Д. *Разработка энергосберегающих технологий при прокатке тонких и особо тонких полос* / Я. Д. Василев // *Наука, производство, предпринимательство – развитие металлургии. НЗЧ. сб. научн. тр. конференции.* – Донецк : ЛИК, 1998. – С. 230–234.
3. *Исследование влияния режима межклетевого натяжения на стабильность процесса и удельный расход энергии на прокатку* / В. Н. Скороходов, Ю. А. Мухин, П. П. Чернов и др. // *Производство проката.* – 2000. – № 6. – С. 9–12.
4. Чернов П. П. *Влияние режимов межклетевого натяжения на удельный расход энергии при тонколистовой холодной прокатке* / П. П. Чернов, Ю. А. Мухин, К. В. Бахаев // *Труды 6 Конгресса прокатчиков.* – Липецк, 2005. – С. 186–190.
5. Василев Я. Д. *Теория продольной прокатки* / Я. Д. Василев, А. А. Минаев. – Донецк : УНИТЕХ, 2010. – 456 с.
6. Целиков А. И. *Теория продольной прокатки* / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
7. Василев Я. Д. *Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки* / Я. Д. Василев. – М. : Металлургия, 1995. – 368 с.
8. Василев Я. Д. *Теоретическое определение среднего коэффициента натяжения при холодной прокатке* / Я. Д. Василев, А. В. Дементенко, Д. Н. Самокиш // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 67–72.

Василев Я. Д. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ;
Самокиш Д. Н. – аспирант НМетАУ;
Замогильный Р. А. – студент НМетАУ;
Кожухарь А. Г. – студент НМетАУ;
Кочаткова С. В. – студент НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: samokyshdmitriy@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15.03.2012 г.