

УДК 621.771.26.01

Середа Б. П.  
Коваленко А. К.**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ НА  
ИЗМЕНЕНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГА ОСЕВОЙ ЗОНЫ  
ПРОКАТЫВАЕМЫХ ВЫСОКИХ ПОЛОС**

Накопление данных о характеристиках напряженно-деформированного состояния прокатываемого металла для различных сочетаний геометрических факторов очага деформации при использовании результатов планируемых экспериментов целесообразно осуществить, аппроксимируя их в виде регрессионных зависимостей. Эта форма представления данных имеет ряд преимуществ. Во-первых, аппроксимированные таким образом данные могут быть использованы в математических моделях процесса прокатки. Во-вторых, в этом случае по величине коэффициентов легко определить степень влияния каждого фактора, а также степень влияния смешанных эффектов на исследуемые функции процесса. И, кроме того, графическое отображение зависимостей в виде поверхностей отклика наглядно представляет закономерности изменения функций в многомерном факторном пространстве [1].

Целью данной работы является создание математической модели влияния геометрических факторов очага деформации на изменение степени деформации сдвига осевой зоны прокатываемых высоких полос.

Ниже рассмотрены результаты аппроксимации одного из основных интегральных показателей – степени деформации сдвига осевой зоны раската в зависимости от геометрических факторов очага деформации. Исходя из физического смысла и результатов исследований, ранее выполненных, изменение  $\Lambda$  для образцов, прокатанных на гладкой бочке валков, полученное в результате обработки информации semifакторного эксперимента, отображали полиномом второго порядка:

$$\Lambda = 2,86 + 3,69x_1^2 + 0,03x_3^2 + 1,92x_4^2 - 0,29x_6^2 + 0,08x_7^2 + 2,03x_1 - 1,01x_1 \cdot x_4 - 0,8x_2 - \quad (1) \\ - 0,31x_1 \cdot x_7 + 0,71x_2 \cdot x_4 + 0,23x_1 \cdot x_6 + 0,01x_3 \cdot x_7 - 4,73x_4 - 0,03x_5 + 0,04x_4 \cdot x_5,$$

где  $x_1 = \varepsilon$ ;  $x_2 = h_0/D$ ;  $x_3 = b_0/h_0$ ;  $x_4 = b_0/l$ ;  $x_5 = \beta/10$ , град;  $x_6 = \Delta f_B/h_0 \cdot 10$ ;  $x_7 = \Delta f_T/h_0 \cdot 10$ .

Выражение (1) адекватно отражает изменение  $\Lambda$  в диапазонах изменения геометрических факторов очага деформации. Среднеквадратическое отклонение аппроксимированных данных от экспериментальных составило 0,045 при максимальном отклонении – 0,15. Адекватность выражения (1) экспериментальным данным следует из того, что в рассмотренном случае отношение дисперсии неадекватности к дисперсии опыта меньше табличного значения критерия Фишера для 5 % уровня значимости [2].

Получено, что наибольшее влияние на  $\Lambda$  в исследуемом интервале варьирования факторов очага деформации оказывает относительное обжатие образцов. Для случая прокатки образцов исходного квадратного поперечного сечения на гладкой бочке валков изменения обжатия от 0,00 до 0,30 обуславливает увеличение  $\Lambda$  от нуля до 0,70 (рис. 1).

Для низких раскатов ( $h_0/D = 0,18$ )  $\Lambda$  больше, чем для высоких ( $h_0/D = 0,78$ ) на 0,1, что объясняется перераспределением максимума накопленных деформаций из приконтактных в центральные слои металла при уменьшении отношения  $h_0/D$ . Увеличение ширины полосы при постоянной его высоте обуславливает рост  $\Lambda$ : в интервале варьирования  $b_0/h_0$  от 0,5 до 1,5  $\Lambda$  изменяется на 0,1 (рис. 2). Влияние  $b_0/h_0$  на  $\Lambda$  в отличие от  $h_0/D$  имеет нелинейный характер (рис. 3), что при необходимости увеличения степени деформации сдвига в осевой зоне раската предполагает достижение повышенных значений  $b_0/h_0$ , т. е. использование технологического приема прокатки «через полосу».

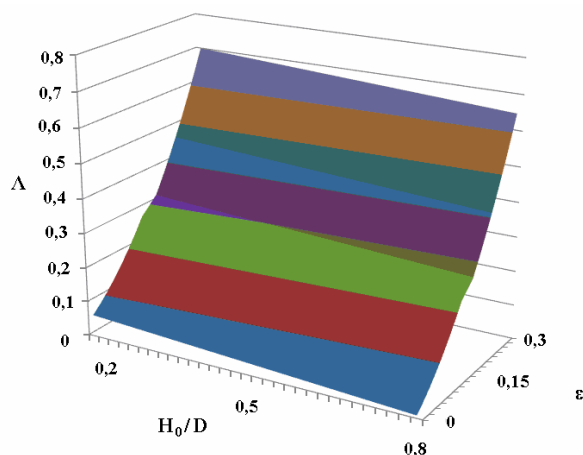


Рис. 1. Влияние относительного обжатия и фактора  $h_0/D$  на  $\Lambda$  при прокатке на гладкой бочке валков:

$b_0/h_0 = 1$ ;  $b_0/l = 1$ ;  $\beta = 0$ ;  $\Delta f_B/h_0 = 0$ ;  $\Delta f_T/b_0 = 0$

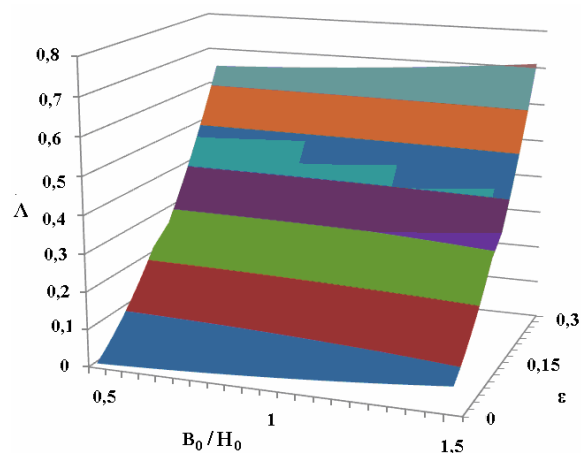


Рис. 2. Влияние факторов  $\epsilon$  и  $b_0/h_0$  на  $\Lambda$  при прокатке на гладкой бочке валков:

$h_0/D = 0,5$ ;  $b_0/l = 1$ ;  $\beta = 0$ ;  $\Delta f_B/h_0 = 0$ ;

$\Delta f_T/b_0 = 0$

Таким образом, при прокатке раскатов исходного прямоугольного сечения направленное варьирование  $h_0/D$  и  $b_0/h_0$  обеспечивает дополнительное изменение  $\Lambda$  на 15...25 %, что существенно при определении условий интенсивной проработки структуры металла.

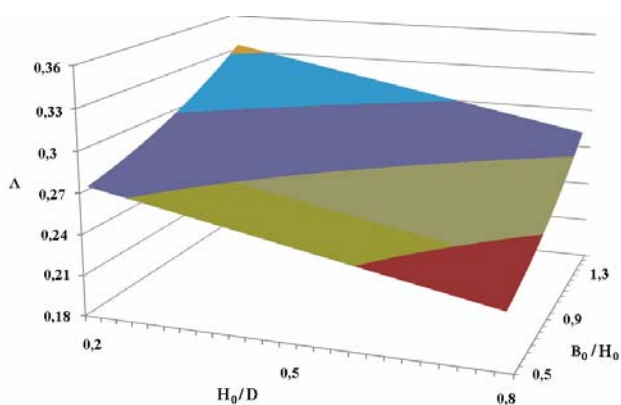


Рис. 3. Влияние факторов  $h_0/D$  и  $b_0/h_0$  на  $\Lambda$  при прокатке на гладкой бочке валков:

$\epsilon = 0,15$ ;  $b_0/l = 1$ ;  $\beta = 0$ ;  $\Delta f_B/h_0 = 0$ ;

$\Delta f_T/b_0 = 0$

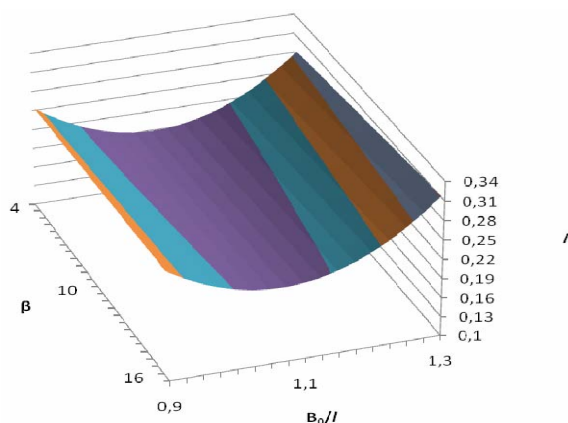


Рис. 4. Влияние профилировки рабочей поверхности гладкой бочки валков на  $\Lambda$ :

$\epsilon = 0,15$ ;  $h_0/D = 1$ ;  $b_0/h_0 = 0,5$ ;  $\Delta f_B/h_0 = 0$ ;

$\Delta f_T/b_0 = 0$

Поиск дополнительных резервов в интенсификации процесса прокатки высоких полос определил использование профилировки валков гладкой бочки блюминга с целью возможно-го увеличения  $\Lambda$ . Профилировку валков характеризовали двумя факторами:  $\beta$  и  $b_0/l$ . Влияние этих факторов на величину степени деформации сдвига осевой зоны раската исследовали для  $\epsilon = 0,15$  и различных конфигураций поперечного сечения раската. Получено, что для случая прокатки высокой узкой полосы ( $h_0/D = 0,8$  и  $b_0/h_0 = 0,5$ ) характерно увеличение  $\Lambda$  с увеличением  $b_0/l$  (рис. 4), достигающие для  $b_0/l = 1,3$ , по сравнению с  $b_0/l = 1,0$  / 50 %. Отмеченный рост  $\Lambda$  обусловлен особенностями пластического течения металла, которое в данном случае характеризуется стремлением к интенсивному уширению приконтактных слоев раската и увеличивающимся с ростом  $b_0/l$  подпирющим действием наклонных участков гладкой бочки валков. Повышение угла наклона  $\beta$  этих участков и увеличение  $b_0/l$  обуславливают перераспределение пластического течения металла с увеличением его интенсивности в осевой зоне раската.

Для рассмотренного случая использование профилировки валков с  $b_0/l = 1,25 \dots 1,30$  при  $\beta = 8 \dots 12$  по степени влияния на  $\Lambda$  эквивалентно увеличению ширины полосы с  $b_0/h_0 = 0,5$  до  $b_0/h_0 = 1,5$ .

Уменьшение высоты полосы до  $h_0/D = 0,5$  и увеличение  $b_0/h_0 = 0,1$  приводит к изменению характера формоизменения металла в раскате и как следствие – к уменьшению  $\Lambda$  (рис. 5), так как в этом случае резко возрастает неравномерность пластического течения металла между осевой зоной металла и объемами металла, прилегающими к боковым граням раската. Здесь абсолютное обжатие центральной по ширине зоны уменьшается при постоянном приведенном обжатии и соответственно увеличении обжатия боковых участков раската. Дальнейший рост  $b_0/l$  как и при прокатке на гладкой бочке валков увеличивает  $\Lambda$  во всем диапазоне варьирования  $\beta$  и  $b_0/l$  (рис. 6). Минимальная разница между значениями  $\Lambda$  для случаев прокатки с  $b_0/l = 0,3$  и  $b_0/l = 1,3$  наблюдается для  $h_0/D = 0,2$  (рис. 7).

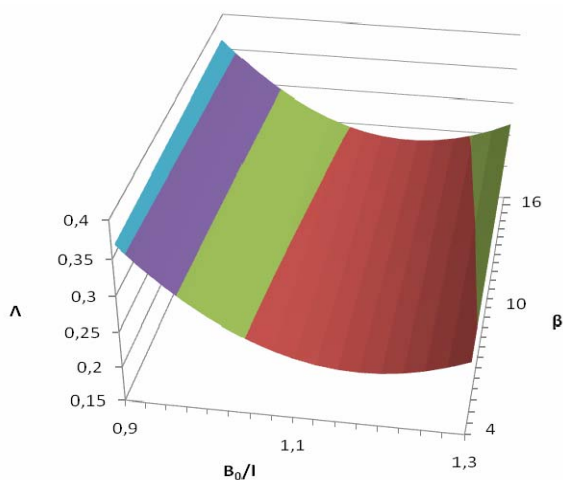


Рис. 5. Влияние профилировки рабочей поверхности гладкой бочки валков на  $\Lambda$ :  
 $\varepsilon = 0,15$ ;  $h_0/D = 0,5$ ;  $b_0/h_0 = 1$ ;  $\Delta f_B/h_0 = 0$ ;  
 $\Delta f_T/b_0 = 0$

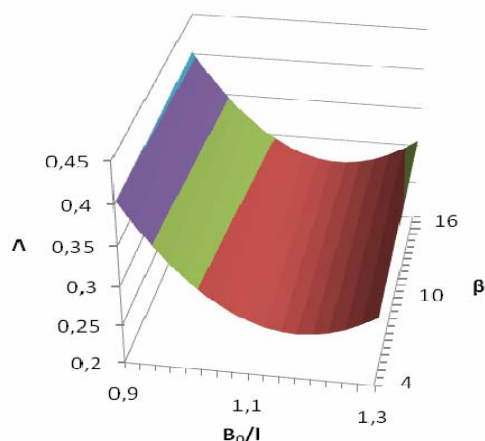


Рис. 6. Влияние профилировки рабочей поверхности гладкой бочки валков на  $\Lambda$ :  
 $\varepsilon = 0,15$ ;  $h_0/D = 0,5$ ;  $b_0/h_0 = 1,5$ ;  $\Delta f_B/h_0 = 0$ ;  
 $\Delta f_T/b_0 = 0$

Следовательно, наличие профилировки валков способствует увеличению  $\Lambda$  только для высоких полос и снижает значение степени деформации сдвига в осевой зоне раската при снижении  $h_0/D$ . Влияние угла  $\beta$  на изменение  $\Lambda$  выражено слабо.

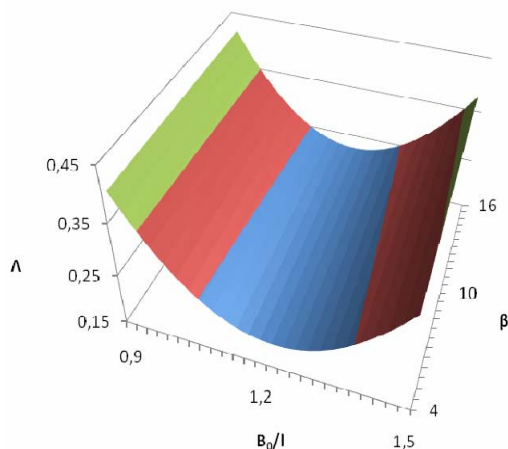


Рис. 7. Влияние профилировки рабочей поверхности гладкой бочки валков на  $\Lambda$ :  
 $\varepsilon = 0,15$ ;  $h_0/D = 0,2$ ;  $b_0/h_0 = 1$ ;  $\Delta f_B/h_0 = 0$ ;  
 $\Delta f_T/b_0 = 0$

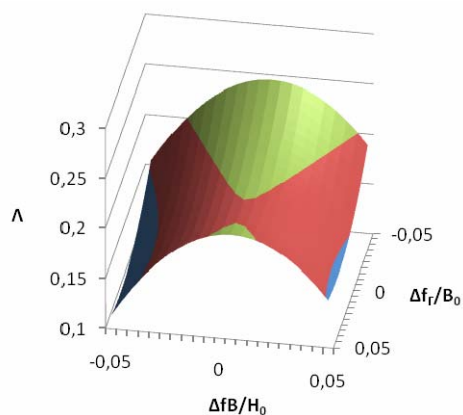


Рис. 8. Влияние конфигурации поперечного сечения полосы на  $\Lambda$  при прокатке на гладкой бочке валков:  
 $\varepsilon = 0,15$ ;  $h_0/D = 1$ ;  $b_0/h_0 = 0,5$ ;  $b_0/l = 1$ ;  $\beta = 0$

Прокатка высоких полос сопровождается искажением исходного прямоугольного поперечного сечения раската. Результаты обработки экспериментальных данных характеризуют существенное влияние на изменение  $\Lambda$  конфигурации боковых граней. Получено, что наибольшее значение  $\Lambda$  принимает при плоских боковых гранях. Наличие на боковых гранях одинарного или двойного бочкообразования резко снижает степень деформации сдвига в осевой зоне раската. Это характерно как для высоких и узких раскатов (рис. 8), так и для низких широких полос (рис. 9).

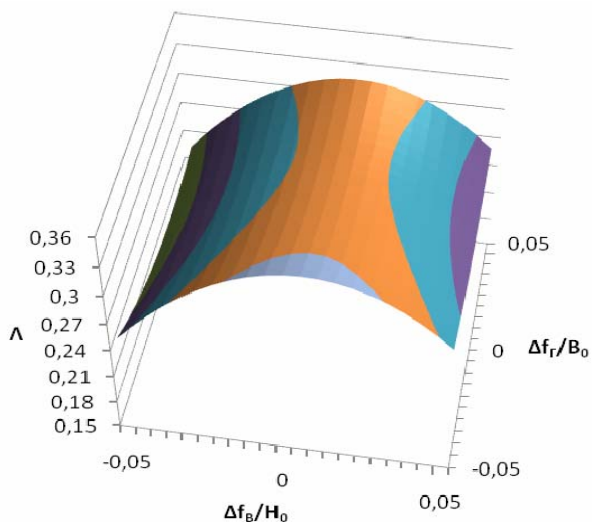


Рис. 9. Влияние конфигурации поперечного сечения полосы на  $\Lambda$  при прокатке на гладкой бочке валков:

$\varepsilon = 0,15$ ;  $h_0/D = 0,5$ ;  $b_0/h_0 = 1,5$ ;  $b_0/l = 1$ ;  $\beta = 0$

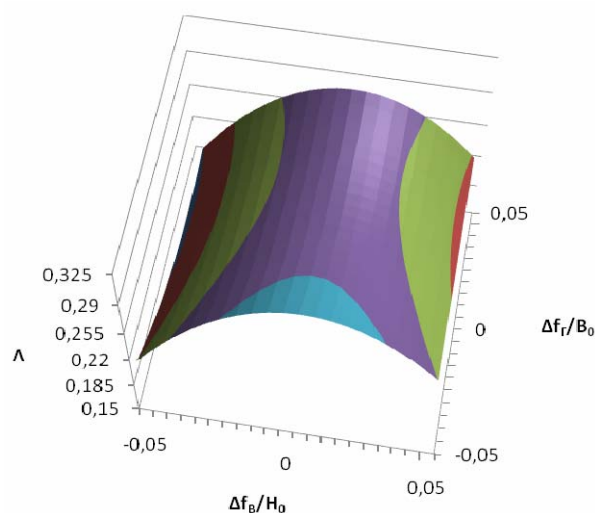


Рис. 10. Влияние конфигурации поперечного сечения полосы на  $\Lambda$  при прокатке на гладкой бочке валков:

$\varepsilon = 0,15$ ;  $h_0/D = 0,5$ ;  $b_0/h_0 = 1$ ;  $b_0/l = 1$ ;  $\beta = 0$

Изменение факторов  $h_0/D$  (рис. 10 и рис. 8),  $b_0/h_0$  (рис. 10–11) и относительного обжатия  $\varepsilon$  (рис. 10 и рис. 12) лишь повышает или понижает уровень  $\Lambda$ . Поэтому с позиций достижения максимальных значений  $\Lambda$  целесообразно обеспечивать в каждом проходе конфигурацию боковых граней прокатываемого тела, близкую к плоской, что предполагает попеременное обжатие раската в горизонтальных и вертикальных валках с достижением значительного превышения текущей ширины раската над его высотой.

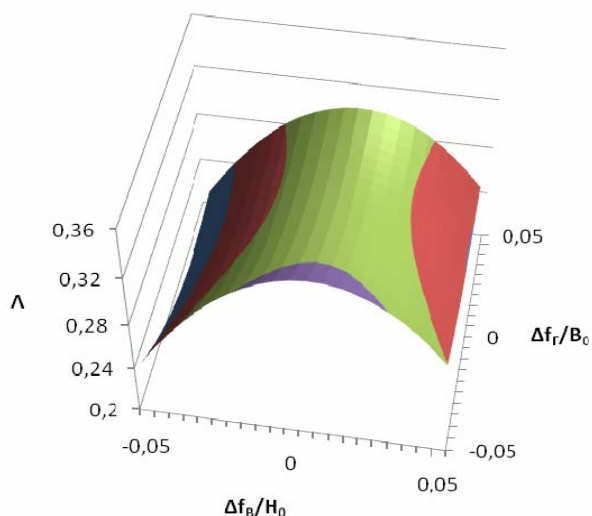


Рис. 11. Влияние конфигурации поперечного сечения полосы на  $\Lambda$  при прокатке на гладкой бочке валков:

$\varepsilon = 0,15$ ;  $h_0/D = 0,2$ ;  $b_0/h_0 = 1$ ;  $b_0/l = 1$ ;  $\beta = 0$

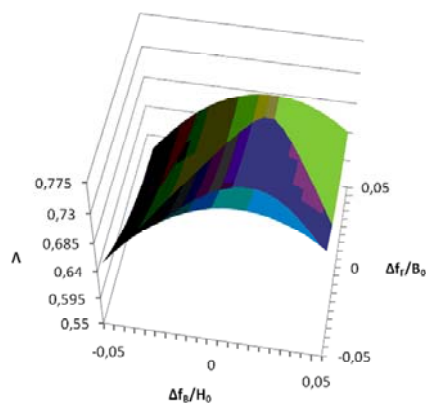


Рис. 12. Влияние конфигурации поперечного сечения полосы на  $\Lambda$  при прокатке на гладкой бочке валков:

$$\varepsilon = 0,3; h_0/D = 0,5; b_0/h_0 = 1; b_0/l = 1; \beta = 0$$

Увеличение выпуклости контактных поверхностей раската в исследуемом диапазоне не превышает уровень  $\Lambda$ , так как при постоянном приведенном обжатии уменьшается деформационное воздействие на угловые зоны раската. Более того, при изменении фактора  $\Delta f_r/b_0$  от  $-0,05$  до  $0,00$   $\Lambda$  даже уменьшается (рис. 11), так как в первом случае конфигурация раската способствует повышению интенсивности пластического течения металла от угла к центру раската, а во втором – нет. Анализ выражения (1) показывает, что только при экстраполяции значений  $\Delta f_r/b_0$  до величины  $0,10$  удастся повысить уровень  $\Lambda$  на  $0,08$ .

## ВЫВОДЫ

Комплектный анализ изменения всех полученных в результате обработки первичных экспериментальных данных характеристик напряженно-деформированного состояния металла в зависимости от значений геометрических факторов очага деформации, в том числе определяющих локальные особенности пластического течения металла, подтвердил правомерность использования экспериментально-теоретического подхода для решения задачи трехмерного пластического течения металла.

Построенные модели могут быть использованы при разработке режимов обжатий и калибровок валков обжимных и толстолистовых станов, обеспечивающих интенсивную проработку структуры металла и (или) минимальную вероятность дефектообразования в результате нарушения его сплошности [3, 4].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колмогоров В. Л. Напряжения. Деформация. Разрушение / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.
2. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М.: Машиностроение, 1980. – 304 с.
3. Серeda Б. П. Технология производства прутков из стали 40 ХГМ диаметром 200...275 мм / Б. П. Серeda, А. К. Коваленко, Ю. А. Белоконь // Металургия: зб. наук. праць: Запоріжжя, 2010. – № 21. – С. 166–170.
4. Розробка оптимальних режимів прокатки та після деформаційної обробки прутків зі спеціальної сталі діаметром більше 270 мм / Б. П. Серeda, О. М. Тумко, І. В. Кругляк, А. К. Коваленко // Металургия: зб. наук. праць: Запоріжжя. – 2009. – № 19. – С. 109–114.

Серeda Б. П. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ЗГИА, академик академии наук высшей школы Украины;

Коваленко А. К. – аспирант ЗГИА.

ЗГИА – Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье.

E-mail: vesnoplyas@mail.ru