

*А. А. Кульков, А. С. Шинкарук, Р. Х. Рафиков*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДОКРАСОЧНОЙ ПОДГОТОВКИ КУЗОВОВ ВАГОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ

**Аннотация.** Представлены результаты исследований по улучшению процесса предокрасочной подготовки кузовов вагонов на основе моделирования процесса очистки и формирования качества поверхности. В работе проведено исследование физико-механических свойств сред эксплуатационных загрязнений, находящихся на кузовной части подвижного состава при приемке в ремонт. Результаты показали, что большинство типов загрязнений могут быть соотнесены по шкале твердости Мооса с известными материалами, что существенно облегчает их исследование. На основе полученных данных в статье предложена модель очистки и формирования качества предокрасочной подготовки поверхности, применяемая перед нанесением лакокрасочного покрытия. Модель имеет практическое применение в виде конкретных технологических режимов обработки, приведенных в статье.

**Ключевые слова:** подвижной состав, кузов, ремонт, предокрасочная обработка, качество.

**Для цитирования:** Кульков, А. А. Повышение эффективности технологии предокрасочной подготовки кузовов вагонов с использованием модели формирования качества очистки поверхности / А. А. Кульков, А. С. Шинкарук, Р. Х. Рафиков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 15–21. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_1\_15.

### *Введение*

Продолжительность эксплуатации кузовных элементов подвижного состава зависит от качества лакокрасочного покрытия, нанесенного на них, так как кузов в процессе эксплуатации подвергается вредному природному и техногенному воздействию: температурный нагрев на солнце, влияние паров воды и кислорода, а также абразивное воздействие запыленного воздуха [7]. Правильно подобранные современные лакокрасочные материалы способны обеспечить выполнение всех требований к надежной антикоррозионной защите подвижного состава и существенно продлить долговечность срока его службы.

Качественное нанесение защитных покрытий на вагоны в специализированных цехах обеспечивается применением специального окрасочного оборудования, обеспечивающего распыление материалов различной вязкости и плотности, а также за счет привлечения квалифицированных специалистов. Качественная сушка, как важный технологический этап окраски, осуществляется в специальных камерах окрасочных цехов, воздух в которых нагревается до нужных температур электрическим или газовым способами.

В то же время для новых лакокрасочных покрытий нужен и совершенно иной качественный уровень подготовки поверхности к окрашиванию, тогда как технологии подготовки поверхности не менялись уже длительное время и устарели. Их использование не позволяет качественно подготовить поверхность к окраске современными лакокрасочными материалами, при том что антикоррозионная защита может быть эффективной лишь при проведении тщательной очистки поверхности перед окрашиванием. В настоящее время подготовка является наиболее грязным, неэкологичным, вредным и трудоёмким этапом окраски поверхности, загрязняющим окружающую среду и требующим от ремонтного предприятия решения серьезных экологических задач по утилизации отходов [8]. Одной из главных проблем является утилизация моечных растворов, отходов от очистки и окраски, что приводит к серьёзному удорожанию окрасочного производства, в результате себестоимость окрасочных работ существенно повышается [2, 9], увеличивая конечную стоимость ремонта.

В настоящее время в локомотивных и вагонных депо применяют различные методы очистки деталей и узлов [6]. К ним относятся механические, химические, струйные, пневмоабразивные, гидроабразивные, термические и другие способы. Подготовка поверхности подвижного состава к окраске обычно состоит из таких технологических этапов, как обмывка внешней поверхности, демонтаж навесного оборудо-

вания, установка защитных экранов, обработка поверхности свободным абразивом, грунтование, шлифование, герметизация, местное шпатлевание и сушка. В среднем трудоёмкость технологического процесса по обработке одного кузова пассажирского вагона занимает около 24 часов. При этом расходуется достаточно большой объем моечных жидкостей, требующих утилизации, дробы или других свободных абразивов, а также специальных обезжиривающих составов. Оценочные расчеты операционных расходов на ремонт кузова показывают, что на себестоимость работ по восстановлению лакокрасочного покрытия приходится каждый восьмой рубль от общей стоимости ремонта, а трудовые затраты на подготовку к окрашиванию превосходят трудозатраты на само окрашивание более чем в 2 раза.

Исходя из этого, возникает вопрос о разработке и применении новой, более эффективной технологии подготовки поверхности. Газодинамический метод является более эффективным по сравнению с традиционными методами очистки и может быть применен в железнодорожной отрасли. Применение данного способа позволит увеличить скорость очистки и обезжиривания поверхности, однако для его эффективного применения необходимо изучение закономерностей взаимодействия между газодинамическим потоком и кузовом вагона, во избежание его повреждения или порчи при обработке. Также необходим анализ физико-механических свойств среды эксплуатационных загрязнений для получения возможности прогнозирования скорости ее разрушения. Это позволит вкладывать в очистку лишь минимально необходимое количество энергии, достаточное для разрушения среды загрязнений, что существенно повысит эффективность процесса подготовки поверхности в целом. Исследование физико-механических свойств эксплуатационных загрязнений позволяет оптимизировать процесс очистки, выведя её эффективность на новый уровень.

### *Основная часть*

Изучение свойств эксплуатационных загрязнений начинается с исследования скорости разрушения этой среды под действием газодинамического потока. С этой целью исследуется столкновение частицы абразива с поверхностью и рассчитываются параметры оставляемых срезов. С использованием теоретической модели столкновения определяется глубина врезания частицы в среду, если предполагается, что весь деформированный материал будет удалён или разрушен. В то же время при столкновении не происходит деформация частицы, а лишь поверхности среды загрязнений, приводя к образованию на поверхности среза вытянутой формы, глубина которого определяется путем применения закона контактного взаимодействия двух тел [3, 10]. Таким образом, максимальная глубина образующихся на поверхности срезов может быть исследована и оценена количественно.

Глубина среза, полученного от столкновения частицы дробы и поверхности, характеризуется массой частицы, её скоростью при столкновении и физико-механическими свойствами частицы дробы и разрушаемой среды загрязнений. Также установлено, что глубина и диаметр оставляемого частицей следа меняются прямо пропорционально изменению скорости и массы частиц, составляя около четверти диаметра частиц при скорости 50 м/с в случае применения кварцевого песка как абразива. Используя более твердый материал – стальную или чугунную дробь, можно достичь изменения глубины и ширины среза до 50 % от диаметра частиц при тех же скоростях.

Исследования показали, что твердость частиц абразива, твердость обрабатываемого материала, скорость частицы, угол столкновения и диаметр являются основными факторами, оказывающими влияние на глубину врезания. Рассмотрим их по отдельности.

Твердость частицы абразива является одним из основных факторов при столкновении, от которого зависит кинетическая энергии частицы, идущая на полезную работу (деформирование и разрушение обрабатываемого материала) и расход энергии на бесполезную работу (деформирование и разрушение самой частицы, упругое отталкивание). Больше бесполезной работы совершается в случае снижения твердости материала частицы. Основным материалом для изготовления абразивов, применяемых при ремонте вагонов и локомотивов, является сталь, чугун, минералы и отходы литейного производства – шлаки и окислы. Оценка твердости абразивов металлической основы осуществляется по шкале Бринелля и Виккерса, а минеральные абразивы, шлаки и окислы оцениваются по шкале Мооса [5].

Твердость разрушаемой среды загрязнений является следующим фактором, влияющим на скорость ее разрушения. Более твердая поверхность создает условия к совершению частицами большего объема бесполезной работы, что в результате снижает скорость очистки.

Следующий фактор, скорость частицы, характеризует величину кинетической энергии столкновения. Более высокая скорость частиц создает большую кинетическую энергию единичных столкновений, и как результат, очистка производится эффективнее. Специфика применения газодинамических установок свидетельствует о том, что скорость частиц перед столкновением с обрабатываемой

поверхностью зависит от режима работы газодинамической установки и расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности. Форма следа при столкновении частицы и поверхности зависит от угла столкновения. След становится меньшей глубины и принимает продолговатую форму в случае столкновения под острым углом и является круглым и более глубоким при более тупом угле. Масса разрушенного материала при этом существенно не меняется. Обработка под углом более 30° не влияет существенно на скорость очистки. В то же время для формирования шероховатости поверхностного слоя угол обработки важен.

Следующий фактор – диаметр частицы абразива, оказывающий влияние на размер следа частицы и величину разрушаемой области. Габариты оставляемого следа напрямую зависят от размеров частицы. Кроме того, крупные и массивные частицы абразива двигаются инертнее, ускоряясь газодинамическим потоком медленнее и набирая меньшую скорость, чем мелкие и легкие частицы [1].

В уравнениях для определения глубины среза применяется коэффициент  $f$ , характеризующий физико-механические свойства среды загрязнений, значения которого для большинства сред загрязнений не известны. Для его определения были проведены исследования разных типов загрязнений путем нанесения царапин на загрязненные образцы. Исследования показали, что большинство типов эксплуатационных загрязнений подвижного состава, приходящего в ремонт, по показателям твердости соответствуют распространенным неметаллическим материалам, таким как, например, асбест или прессованная ткань бельтинг.

Эти данные были получены путем соотношения по шкале Мооса сред загрязнений с выбранными материалами. Применение материала заменителя (асбеста и бельтинга) в экспериментах позволяет исследовать их скорость разрушения под действием газодинамического потока. Получив скорость разрушения материалов заменителей, можно предположить, что с той же скоростью будет происходить и разрушение среды загрязнений, что позволяет экстраполировать полученные экспериментальные данные на соответствующие загрязнения. По результатам исследований установлено, что основные типы загрязнений имеют следующий класс твердости по шкале Мооса: асфальтоподобные наслоения – 5 класс; нагар, коррозия и старое лакокрасочное покрытие – 10 класс твердости.

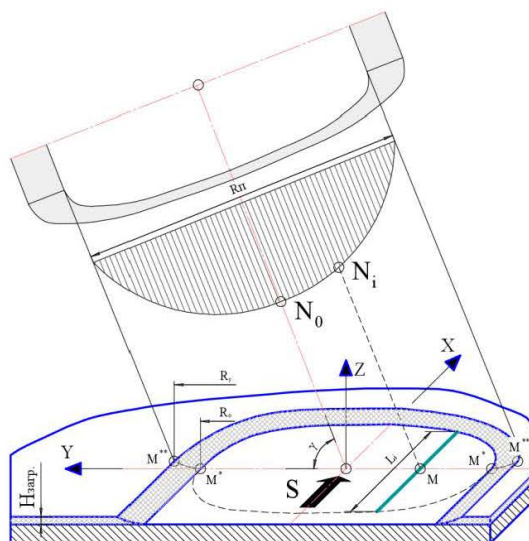
Материалы – заменители среды загрязнений и их свойства

Фотография	Наименование типа загрязнений	Консистенция	Примерный класс твердости по шкале Мооса	Материал-заменитель	Фотография
	Асфальтоподобные наслоения	Твердое	~ 5 (царапается пластиком)	Асбест	
	Нагар	Твёрдое Хрупкое	~ 10 (царапается металлом)	Бельтинг	
	Коррозия	Твёрдое Хрупкое	~ 10 (царапается металлом)	Бельтинг	
	Старое лакокрасочное покрытие	Твёрдое	~ 10 (царапается металлом)	Бельтинг	

Знание физико-механических свойств среды загрязнений позволяет прогнозировать скорость ее разрушения, что, в свою очередь, поможет достичь максимального КПД процесса очистки, вкладывая в столкновение только то количество энергии, которое необходимо для разрушения среды, фактически без совершения посторонней работы.

Разрушение среды загрязнений под действием газодинамического потока – сложный и многофакторный процесс. Для его оценки введём величину  $\psi$  – средняя глубина разрушения, оставляемая одной частицей абразива заданной твёрдости, массы и скорости в среде загрязнений известных физико-механических свойств. Параметр  $\psi$  позволяет оценить точечную разрушающую способность газодинамической струи. Одной из проблем, связанных с величиной  $\psi$  является непредсказуемость механики разрушения большинства сред загрязнений. Она была решена через получение таблицы соотношений сред загрязнений с известными материалами. После этого, через оценку точечной разрушающей способности частиц возможно смоделировать технологический цикл очистки с высокой точностью, что в свою очередь позволит через правильное регулирование режимов обработки, достичь производительности и качества очистки на значительно более высоком уровне.

Математическое моделирование технологических процессов позволяет оценить их с той точностью, которая недостижима при простой производственной отладке. Процессы обработки свободным абразивом, как правило, смоделированы под конкретные технологические условия в определенной отрасли. Это обусловлено тем, что процесс обработки свободным абразивом – сложная для моделирования среда и расширение условий при создании модели приводит к резкому снижению её точности. Эта проблема актуальна и при моделировании процесса газодинамической обработки, где ко всему прочему добавляется еще и фактор температурного воздействия на среду загрязнений, наряду с механическим. Ниже представлена схема воздействия газодинамического потока на среду загрязнений обшивки кузова.



#### Схема воздействия газодинамического потока на поверхность обшивки кузова:

$N_i$  – количество частиц, попадающих в точку  $M$  в единицу времени (частиц/с),  $N_0$  – количество частиц в единицу времени в центре потока (частиц/с),  $R_n$  – радиус газодинамического потока (мм),  $M$  – произвольная точка в пятне контакта,  $M^*$  – точка на краю зоны очистки,  $M^{**}$  – точка на краю пятна контакта,  $R_y$  – проекция радиуса газодинамического потока на плоскость очистки (мм),  $R_0$  – радиус очистки (мм),  $L_i$  – траектория движения точки  $M$  по площади пятна контакта (мм),  $S$  – скорость поперечной подачи сопла (м/с)

Полагая, что условием полной очистки в точке  $M$  должно быть то, что глубина разрушения  $H_i$  должна быть равна толщине слоя загрязнений  $H_{загр}$ , можно записать уравнение для скорости подачи сопла  $S$ , обеспечивающей выполнение данного условия:

$$S = N_i \cdot \psi_{ср} \cdot \frac{L_i}{H_{загр}}$$

Очевидно, что точка  $M^*$  (см. рисунок), находящаяся ближе к краю пятна контакта, испытывает менее интенсивное по силе и более короткое по времени воздействие газодинамического потока. Глубина разрушения в ней будет меньше. Точка  $M^{**}$  на краю пятна контакта вообще не испытывает никакого воздействия. Критерием очистки можно считать разрушение слоя среды загрязнения в критической точке. Однако такой точки в пятне контакта нет. Точки, более удаленные от центра, испытывают меньше воздействия.

Таким образом, параметр  $R_o$  характеризует удаленность точки  $M^*$  от центра пятна контакта и устанавливает границу зоны очистки. При этом участок между  $R_n$  и  $R_o^*$  (см. рисунок) можно считать зоной получистки, где частично остается среда загрязнений.

Параметр  $R_o$  и скорость подачи  $S$  (м/с) связаны напрямую. С уменьшением радиуса очистки  $R_o$ , возрастает скорость подачи (м/с), иными словами, скорость подачи большая, но оставляет за собой более узкий очищающий след.

Так же следует отметить, что эффективную работу по удалению среды загрязнений совершает та область газодинамического потока, которая находится по окружности между точками  $M^*$  и  $M^{**}$ . Остальные области между точкой  $M^*$  и центром пятна контакта совершают работу по деформированию поверхности обшивки кузова.

Рассмотрим вариант решения этой проблемы, при условии что сопло движется автоматизированно с постоянной скоростью подачи  $S$  (м/с). Тогда единственным очевидным способом повышения энергоэффективности работы газодинамического потока будет обработка внахлест. Пятно контакта движется по поверхности, наполовину пересекая прошлый очищенный след, то есть  $\Delta l = R_y$ , тогда заштрихованная область пятна контакта будет совершать уже двойную работу по очистке, тем самым повысив эффективность процесса. При автоматической обработке возможно регулирование подачи с погрешностью позиционирования менее 1 мм. При таких условиях можно выбрать траекторию обработки, при которой эффективность будет максимальна.

### Выводы

В результате проведенных исследований физико-механических свойств среды загрязнений и созданной модели предложены следующие энергоэффективные режимы очистки поверхностей кузовной части подвижного состава. Их классификация производится в зависимости от производительности и состоит из пяти групп. Ниже перечислены параметры каждого из режимов газодинамической обработки, используемые для очистки различных типов эксплуатационных загрязнений в зависимости от их толщины [4].

Перечисленные режимы позволяют не только очищать различные типы загрязнённых поверхностей локомотивов и вагонов при ремонте, но и применять при подготовке металлических поверхностей нового кузова к заводской окраске с наименьшим расходом энергии и высоким качеством.

### Список литературы

- 1 Кульков, А. А. Особенности абразивно-струйной обработки металлических поверхностей перед окрашиванием / А. А. Кульков, М. А. Ларионов // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 12 (90). – С. 15–20. – ISSN 2223-4608.
- 2 Кульков, А. А. Оценка эффективности процесса обработки поверхностей вагонов перед окраской / А. А. Кульков, Д. Г. Евсеев, А. Ю. Коротков // Металлообработка. – 2016. – № 4 (94). – С. 66–67. – ISSN 1684-6702.
- 3 Куликов, М. Ю. Оценка технико-экономической эффективности процесса абразивоструйной обработки металлических элементов кузовов железнодорожных вагонов / М. Ю. Куликов, А. А. Кульков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 6 (79). – С. 65–68. – ISSN 1999-8775.
- 4 Куликов, М. Ю. Технико-экономические особенности обработки поверхностей вагонов перед окрашиванием / М. Ю. Куликов, А. А. Кульков // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 5 (95). – С. 39–41. – ISSN 2223-4608.
- 5 Кульков, А. А. Ультразвуковое жидкостное матирование металлических поверхностей /

### References

- 1 Kulkov, A. A. Features of abrasive-jet treatment of metal surfaces before staining / A. A. Kulkov, M. A. Larionov // High-tech technologies in mechanical engineering. – 2018. – No. 12 (90). – P. 15–20. – ISSN 2223-4608.
- 2 Kulkov, A. A. Evaluation of the effectiveness of the surface treatment of wagons before painting / A. A. Kulkov, D. G. Evseev, A. Yu. Korytov Metalworking. – 2016. – No. 4 (94). – P. 66–67. – ISSN 1684-6702.
- 3 Kulikov, M. Yu. Assessment of the technical and economic efficiency of the process of abrasive blasting of metal elements of railway car bodies / M. Yu. Kulikov, A. A. Kulkov // Bulletin of the Bryansk State Technical University. – 2019. – No. 6 (79). – P. 65–68. – ISSN 1999-8775.
- 4 Kulikov, M. Yu. Technical and economic features of surface treatment of wagons before painting / M. Yu. Kulikov, A. A. Kulkov // High-tech technologies in mechanical engineering. – 2019. – No. 5 (95). – P. 39–41. – ISSN 2223-4608.
- 5 Kulkov, A. A. Ultrasonic liquid matting of metal surfaces / A. A. Kulkov, V. E. Inozemtsev

А. А. Кульков, В. Е. Иноземцев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 3 (64). – С. 40–43. – ISSN 1999-8775.

6 **Финоченко, В. А.** Анализ экозащитных технологий на станциях реостатных испытаний локомотивных депо / В. А. Финоченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 42–47. – DOI 10.46973/0201-727X\_2022\_2\_42.

7 **Финоченко, В. А.** Технологии защиты окружающей среды от воздействий железнодорожного транспорта / В. А. Финоченко, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (54). – С. 62–64. – ISSN 0201-727X.

8 **Финоченко, В. А.** Инженерная экология : учебное пособие / В. А. Финоченко, Г. Н. Соколова, Т. А. Финоченко. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – 163 с. – ISBN 978-5-88814-855-6.

9 **Кульков, А. А.** Обеспечение качества предокрасочной подготовки поверхности обшивки вагонов газодинамическим методом / А. А. Кульков // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 7 (19). – С. 59–65. – ISSN 2782-5957.

// Bulletin of the Bryansk State Technical University. – 2018. – No. 3 (64). – P. 40–43. – ISSN 1999-8775.

6 **Finochenko, V. A.** Analysis of environmental protection technologies at rheostat testing stations of locomotive depots / V. A. Finochenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 42–47. – DOI 10.46973/0201-727X\_2022\_2\_42.

7 **Finochenko, V. A.** Technologies of environmental protection from the effects of railway transport / V. A. Finochenko, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (54). – P. 62–64. – ISSN 0201-727X.

8 **Finochenko, V. A.** Engineering ecology: Text book / V. A. Finochenko, G. N. Sokolova, T. A. Finochenko. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – 163 p. – ISBN 978-5-88814-855-6.

9 **Kulkov, A. A.** Ensuring the quality of pre-paint preparation of the surface of the lining of wagons by the gas-dynamic method / A. A. Kulkov // Transport engineering. – 2023. – No. 7 (19). – P. 59–65. – ISSN 2782-5957.

*A. A. Kulkov, A. S. Shinkaruk, R. H. Rafikov*

#### INCREASING THE EFFICIENCY OF PRE-PAINTING TECHNOLOGY OF CAR BODIES USING THE MODEL FORMATION OF SURFACE CLEANING QUALITY

**Abstract.** The results of research on improving the process of pre-painting preparation of car bodies based on modeling the cleaning process and the formation of surface quality are presented. The work carried out a study of the physical and mechanical properties of operational contaminant media located on the body part of the rolling stock that accepted for repair. The results showed that most types of contaminants can be correlated on the Mohs hardness scale with known materials, which greatly facilitates their study. Based on the data obtained, the article proposes a model for cleaning and forming the quality of pre-painting surface preparation, used before applying the paint and varnish coating. The model has practical application in the form of specific technological processing modes given in this paper.

**Keywords:** rolling stock, bodywork, repair, pre-painting, quality.

**For citation:** Kulkov, A. A. Increasing the efficiency of pre-painting technology of car bodies using the model formation of surface cleaning quality / A. A. Kulkov, A. S. Shinkaruk, R. H. Rafikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 15–21. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_1\_15.

#### Сведения об авторах

Кульков Анатолий Александрович  
Российский университет транспорта  
(РУТ МИИТ),  
кафедра «Технология транспортного  
машиностроения и ремонта подвижного  
состава»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: pow12@mail.ru

#### Information about the authors

Kulkov Anatoly Alexandrovich  
Russian University of Transport (RUT MIIT),  
Chair «Technology of Transport Engineering  
and Repair of Rolling Stock»,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: pow12@mail.ru

**Шинкарук Андрей Сергеевич**

Российский университет транспорта  
(РУТ МИИТ),

кафедра «Технология транспортного  
машиностроения и ремонта подвижного  
состава»,

кандидат технических наук,

e-mail: shinkarukas@mail.ru

**Рафиков Рафик Хайдарович**

Российский университет транспорта  
(РУТ МИИТ),

кафедра «Технология транспортного  
машиностроения и ремонта подвижного  
состава»,

кандидат технических наук,

e-mail: rafis-89@mail.ru

**Shinkaruk Andrey Sergeevich**

Russian University of Transport (RUT MIIT),  
Chair «Technology of Transport Engineering  
and Repair of Rolling Stock»,

Candidate of Engineering Sciences,

e-mail: shinkarukas@mail.ru

**Rafikov Rafik Haidarovich**

Russian University of Transport (RUT MIIT),  
Chair «Technology of Transport Engineering  
and Repair of Rolling Stock»,

Candidate of Engineering Sciences,

e-mail: rafis-89@mail.ru