

Проблемы сепарации высокотемпературного многофазного потока и схемы сепарирующих устройств

© Е.А. Андреев, А.Н. Бобров, С.Ф. Максимов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты аналитического обзора имеющихся литературных данных по схемным решениям инерционных сепараторов, проведен дифференцированный анализ характеристик сепарирующих устройств различного типа предложены наиболее перспективные схемные решения сепарирующих устройств применительно к сепарации высокотемпературного многофазного потока.

Ключевые слова: установка бортовая энергетическая, турбина, продукты сгорания, рабочее тело многофазное, инерционные сепарирующие устройства, схемные решения, проблемы сепарации.

Вследствие угрозы необратимых последствий воздействия хозяйственной деятельности человека на окружающую среду задача создания эффективных пылеулавливающих (сепарирующих) устройств является актуальной для химической, нефтегазовой, угледобывающей промышленности, тяжелой индустрии, транспорта, энергетики и других отраслей хозяйства. Развитие ракетной техники и авиации идет по пути использования более энергоемких топлив, в том числе металлизированных. Наличие твердых частиц в продуктах сгорания может приводить к эрозионному изнашиванию элементов проточной части энергосиловых установок, снижению их эффективности, ресурса и надежности. Это потребовало создания высокоэффективных предтурбинных сепарирующих устройств.

Анализ литературы [1–14] показывает, что к настоящему времени создано множество сепарирующих устройств, которые по принципу действия можно условно подразделить на сухие механические сепараторы и мокрые сепараторы. Применение фильтров и электрофильтров для очистки высокотемпературного двухфазного потока в энергосиловых установках проблематично по следующим причинам: отсутствие жаропрочных и жаростойких фильтрующих материалов; высокая исходная концентрация частиц в продуктах сгорания металлосодержащих топлив, что обуславливает большие гидравлические потери или большие габариты фильтрующих элементов; необходимость очень мощного источника питания у электрофильтров, поскольку частицы немагнитны. Применение процесса мокрого пылеулавливания при сепарации высокотемпературного потока весьма

ограниченно, так как подача воды для улавливания частиц ведет к снижению температуры рабочего тела и эффективности энергосило-вой установки.

Наибольшее распространение в технике получили сухие механические (или инерционные) сепараторы. Принцип их действия основан на том, что при изменении направления движения двухфазного потока частицы, обладающие большей плотностью по сравнению с плотностью газа, под действием инерционной силы стремятся сохранить свое первоначальное направление движения и, таким образом, могут быть выделены из потока. Именно на базе таких устройств ведется разработка сепарирующих устройств энергосиловых установок.

Инерционные сепарирующие устройства. Сухие инерционные сепараторы можно подразделить на статические (рис. 1) и динамические.

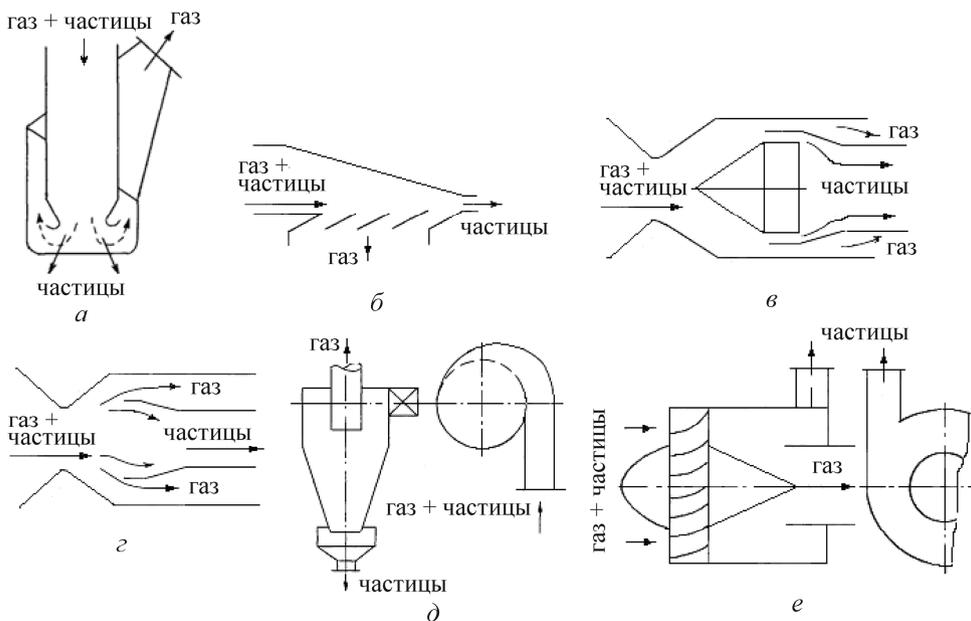


Рис. 1. Схемы статических инерционных сепарирующих устройств (а–е)

Среди статических сепараторов, в свою очередь, можно выделить несколько групп устройств.

К первой группе относятся струйные инерционные сепараторы (рис. 1, а). В них газовый поток изменяет направление движения на $160...180^\circ$. При этом частицы, продолжая свое прямолинейное движение, улавливаются в бункере. Такие сепараторы целесообразно применять для улавливания крупных частиц размером более $70...80 \text{ мкм}$ [2]. Достоинствами сепараторов такого типа являются стойкость к эрозии, малое гидравлическое сопротивление, а также

простота конструкции, недостатком — низкая эффективность сепарации частиц размером менее 70 мкм.

Ко второй группе относятся жалюзийные сепараторы (рис. 1, б). В основу их работы положен принцип внезапного изменения направления газового потока при столкновении с решеткой, состоящей из наклонных пластин. Очищенный газ проходит через жалюзи, а остальной газовый поток с уловленными частицами сбрасывается из установки. По данным [3, 4], при размерах частиц более 30 мкм коэффициент сепарации жалюзийных решеток достигает 0,93...0,97, а коэффициент гидравлического сопротивления 3...9. Сепараторы этого типа, как и предыдущего, применяются в основном для предварительной очистки от наиболее крупных частиц. К недостаткам жалюзийных сепараторов можно отнести вероятность забивания щелей при работе на сильнослипающихся пылях и эрозионное изнашивание жалюзи.

К третьей группе относятся конфузорные инерционные сепараторы (которые также называют баллистическими). Сепарация в них обусловлена отклонением твердых частиц от направления потока газа при его движении в конфузорно-диффузорном канале. Конфузорные сепараторы различают по виду сепарирующего элемента: прямой конус с периферийным отводом отсепарированных частиц (рис. 1, в) и обратный конус с центральным отводом (рис. 1, г). В сепараторе с коническим сепарирующим элементом двухфазный поток ускоряется в разгонном сопле и подается на сепарирующий конус, на котором при развороте газа осаждаются частицы. Отсепарированные частицы образуют на поверхности конуса слой, который по инерции, а также под действием аэродинамических сил перемещается на периферию, где с помощью отбойного кольца разделяется на чистый газ и отсепарированную фазу. Сепараторы этого типа компактны и при размерах частиц более 60 мкм обеспечивают коэффициент сепарации 0,95...0,98. Коэффициент гидравлического сопротивления относительно мал и составляет 3...6 [5]. Недостаток сепараторов этого типа — эрозионное изнашивание острых кромок (вершина конуса, отбойное кольцо), приводящее к снижению эффективности сепарации. Этим недостатком не обладает сепаратор с обратным конусом, имеющий центральный отвод. Двухфазная смесь ускоряется в разгонном сопле, после этого газ отклоняется к периферии, а частицы, сохраняя направление к оси канала, полученное в разгонном сопле, улавливаются обратным конусом. Инерционные сепараторы такой конструкции, согласно [3], имеют коэффициент сепарации 0,80...0,87 при размере частиц до 80 мкм, что делает целесообразным их применение на предварительной ступени сепарации.

К четвертой группе относятся циклонные сепараторы, обладающие преимуществами, отмеченными в [1]: отсутствием движущихся

частей; способностью улавливать частицы размером до 5 мкм; надежным функционированием при высоких температурах и давлениях газа; эрозионной стойкостью; неизменностью гидравлического сопротивления в процессе работы; эффективностью очистки при высокой концентрации частиц.

По аэродинамической схеме потока в пылеуловителе циклонные сепараторы делятся на возвратно-поточные (рис. 1, *д*) и прямоточные. Удаление пыли из газов в возвратно-поточном циклонном пылеуловителе протекает в две стадии. На первой стадии частицы переносятся в зону осаждения под действием центробежной силы. Вторая стадия — отделение частиц — начинается, когда концентрация частиц превысит ту, которую в состоянии переносить газовый поток. Согласно экспериментальным данным, максимальная эффективность возвратно-поточных циклонных сепараторов соответствует скоростям входа потока в диапазоне 12...25 м/с и достигает значений $K_c = 0,98$ [1–3, 6–10]. Осевая скорость потока после разворота в сторону выхлопной трубы должна быть достаточно малой, чтобы не захватывались уже отсепарированные частицы. Именно малые скорости, приводящие к большим габаритам, и относительно большое гидравлическое сопротивление (30...150) делают нецелесообразным применение возвратно-поточных циклонных сепараторов в современных энергоустановках.

Процесс сепарации в прямоточном циклонном сепараторе (рис. 1, *е*) происходит аналогично процессу в возвратно-поточном с той лишь разницей, что отсепарированные частицы и очищенный газ движутся «прямотоком», в одном направлении, что существенно снижает гидравлическое сопротивление и позволяет организовать экономичный отвод частиц небольшими утечками транспортирующего газа в тангенциальный канал. Исследования прямоточных циклонных сепараторов [11–14] позволяют сделать вывод о том, что прямоточный циклонный сепаратор, обладая, по сравнению с возвратно-поточным, такими важными преимуществами, как компактность, низкое гидравлическое сопротивление, возможность организации непрерывного выноса отсепарированных частиц малыми утечками транспортирующего газа, делающими возможным применение данного типа сепаратора в качестве элемента энергосиловой установки, имеет один существенный недостаток — относительно невысокий коэффициент сепарации, как правило, не превышающий 0,80...0,85.

В динамических пылеотделителях сепарация частиц происходит при движении двухфазного потока в каналах вращающегося ротора под действием центробежных сил и кориолисовых сил инерции (рис. 2). По направлению движения газа в сепарирующем роторе конструкции динамических сепараторов можно разделить на три группы.

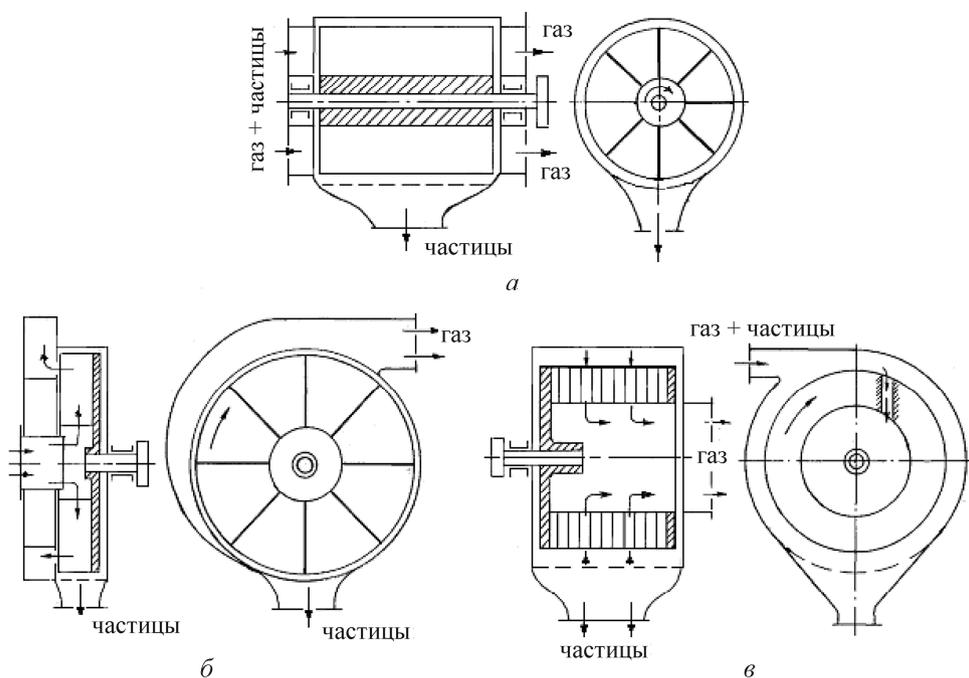


Рис. 2. Схемы динамических инерционных сепарирующих устройств (а–в)

Первая группа — сепараторы с осевым движением газа (рис. 2, а). В них основной поток газа движется вдоль осевых каналов вращающегося ротора. Траектории частицы пыли отклоняются в радиальном направлении (под действием центробежных сил) и в сторону набегающих лопаток ротора (под действием кориолисовых сил инерции). Отделяются от газового потока те частицы, которые выходят за радиальные пределы ротора раньше, чем поток вынесет их из каналов в осевом направлении.

Вторую группу составляют сепараторы с центробежным движением газа (рис. 2, б). В них основной газовый поток и пыль движутся в радиальном направлении от оси вращения ротора. В результате действия центробежных и кориолисовых сил частицы пыли перемещаются к периферии ротора в направлении к пылесборнику. Очищенный газовый поток выходит через специальный патрубок.

В пылеуловителях с центростремительным движением газа (третья группа, рис. 2, в) газ всасывается вентиляторным колесом в каналы ротора и движется от периферии к его оси, т. е. в сторону, обратную направлению центробежных сил. Под действием сил инерции частицы пыли отбрасываются в кожух аппарата и направляются в пылесборник. Такие сепараторы не получили широкого распростра-

нения, так как по сравнению с аппаратами первой и второй групп их привод требует большого расхода энергии.

Преимущества динамических пылеуловителей по сравнению с другими центробежными аппаратами заключаются в компактности, относительно высокой эффективности, малой металлоемкости. В то же время они имеют и целый ряд недостатков: опасность абразивного изнашивания лопаток; возможность образования отложений на лопатках и, как следствие, дисбаланс ротора; низкая эффективность при улавливании частиц пыли размером менее 10 мкм; сложность в изготовлении.

Сепарация высокотемпературных продуктов сгорания металлизированных топлив. На рис. 3 представлены схемы сепарирующих устройств, созданных на кафедре «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана для работы в составе энергосиловых установок на твердых металлизированных топливах; достигнут коэффициент сепарации 0,8...0,9. В основу положены известные схемы сепарирующих устройств, преобразованные для новых условий работы.

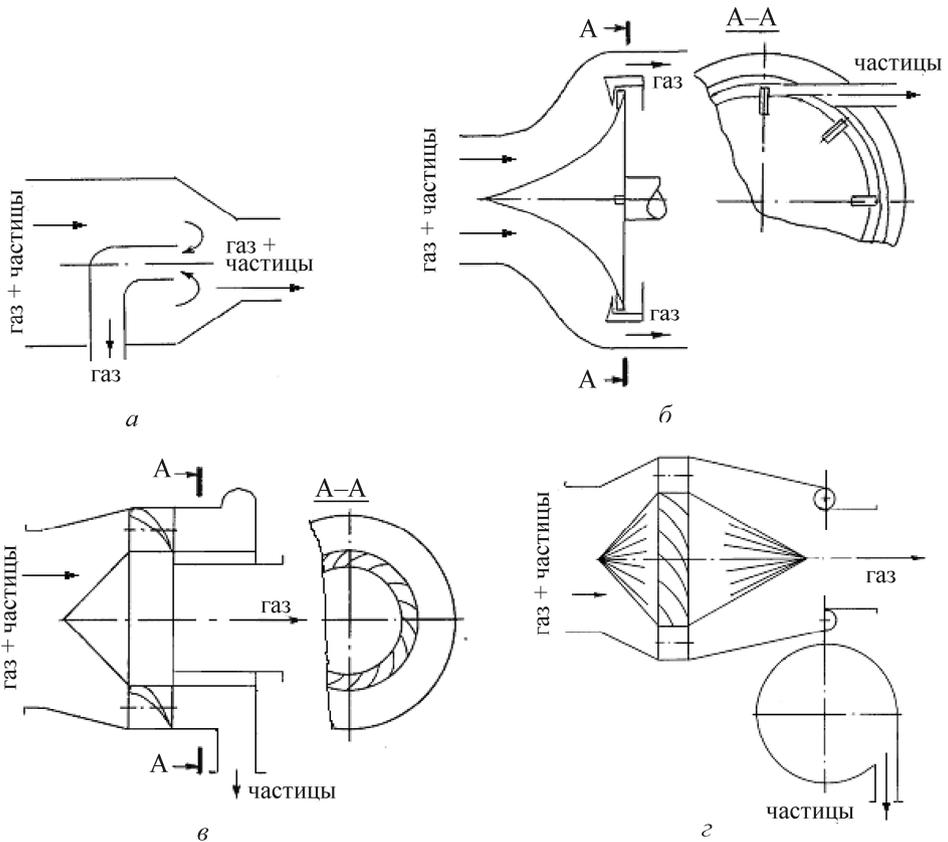


Рис. 3. Схемы инерционных сепарирующих устройств продуктов сгорания металлизированных топлив (а-г)

К сепарирующим устройствам, предназначенным для работы на металлизированных топливах (см. рис. 3), предъявляется ряд специфических требований: улавливание частиц конденсированной фазы на основе магния и алюминия, имеющих высокую химическую и эрозионную активность; давление 6,5...12,0 МПа; температура 530...2400 К; исходные массовые концентрации частиц конденсированной фазы 0,25...0,60.

Для энергосиловых установок, где на турбину, которая и подлежит очистке от частиц конденсированной фазы, отбирается лишь 10...15 % рабочего тела, был разработан предтурбинный сепаратор частичного отбора (рис. 3, а). Сепарация частиц происходит в результате разворота потока на 180° при затекании его в цилиндрический насадок, расположенный на оси потока. Достоинствами этого сепаратора являются его простота и отсутствие проблем с транспортировкой отсепарированных частиц, поскольку они попадают в основной поток и выносятся вместе с ним. К недостаткам следует отнести эрозионное изнашивание входного участка заборника.

Для работы с продуктами сгорания, содержащими оксид магния, создан конический сепаратор с динамическим отводом (рис. 3, б). Вращение конуса препятствует возникновению местного эрозионного изнашивания, ведущего к несимметричному обтеканию, а лопатки, расположенные на периферии конуса, вращаясь, препятствуют зашлаковке заборной щели. Кроме того, они подкручивают отсепарированные частицы с несущим их газом, что позволяет организовать тангенциальное отводящее устройство, более экономичное с точки зрения утечек транспортирующего газа, чем щелевое. Экспериментальные исследования такого сепаратора показали высокий коэффициент сепарации (0,90...0,93) при утечках транспортирующего газа 5...7 %. К недостаткам сепаратора можно отнести сложность конструкции по сравнению со статическими сепараторами и необходимость отбора мощности на привод сепаратора.

Большой интерес представляют экспериментальные исследования центробежно-жалюзийного сепаратора (рис. 3, в), являющегося в настоящий момент одним из наиболее эффективных инерционных сепараторов металлосодержащих топлив. Такое комбинированное устройство, сочетающее в себе прямоточный циклон с жалюзийным уловителем, по существу, является двухступенчатым сепаратором, ступени которого имеют один общий отвод. Полученные данные при давлении 4,0...5,0 МПа и температуре 700 К показывают относительно высокий коэффициент сепарации (при утечках 15 % $K_c = 0,88...0,94$). К недостаткам центробежно-жалюзийного сепаратора следует отнести относительно высокое гидравлическое сопротивление, склонность к зашлаковке лопаточного закручивателя и жалю-

зийной решетки, а также проблемы в обеспечении эрозионной стойкости конструкции при температуре выше 1000 К.

Среди циклонных сепараторов одним из наиболее перспективных является прямоточный циклон, обладающий простой конструкцией, низким гидравлическим сопротивлением, возможностью организации экономичного (с точки зрения утечек транспортирующего газа) тангенциального отводящего устройства. Один из путей повышения эффективности таких устройств — увеличение относительной длины камеры закрутки [11]. При этом, однако, увеличиваются габариты сепаратора, а коэффициент сепарации растет лишь до определенного момента. Другой путь повышения эффективности, предложенный в МГТУ им. Н.Э. Баумана, заключается в применении конфузорных камер закрутки. В конфузорных циклонных камерах увеличение скорости несущего газа при сужении канала компенсирует потери трения и приводит к улучшению работы отводящего устройства. По существу, такой циклонный сепаратор (рис. 3, з) представляет собой комбинацию классического прямоточного циклона и баллистического пылеуловителя.

Из проведенного анализа схем сепараторов на продуктах сгорания металлизированных топлив следует заключить: созданные и испытанные инерционные сепараторы позволяют получать высокие коэффициенты сепарации (0,9 и выше), однако их работа не отличается надежностью (зашлаковка и эрозионное изнашивание проточной части) и экономичностью (для конического сепаратора — большие утечки, для центробежно-жалюзийного — большое гидравлическое сопротивление и т. д.). При дальнейшем совершенствовании сепараторов, работающих в составе современных энергосиловых установок, необходимо идти по пути преодоления этих недостатков, опираясь на накопленный опыт.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ужов В.Н., ред., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. и др. *Очистка промышленных газов от пыли*. Москва, Химия, 1981, 392 с.
- [2] Страус В. *Промышленная очистка газов*. Москва, Химия, 1981, 616 с.
- [3] Степанов Г.Ю., Зицер И.М. *Инерционные воздухоочистители*. Москва, Машиностроение, 1981, 616 с.
- [4] Фукс Н.А. *Успехи механики аэрозолей*. Москва, АН СССР, 1961, с. 39–65.
- [5] Циклаури Г.В., Данилин В.С., Селезнев А.И. *Адиабатные двухфазные течения*. Москва, Атомиздат, 1973, 448 с.
- [6] Разумов И.М., Сычева А.М. *Циклонные сепараторы, конструкции и методы их расчета*. Москва, Машгиз, 1961, 71 с.
- [7] Пирумов А.И. *Аэродинамические основы инерционной сепарации*. Фабрикант Н.Я., ред. Москва, Госстройиздат, 1961, 215 с.
- [8] Пирумов А.И. *Обеспыливание воздуха*. Москва, Стройиздат, 1981, 296 с.
- [9] Русанов А.А. *Очистка дымовых газов в промышленной энергетике*. Москва, Энергия, 1969, 254 с.

- [10] Биргер М.И. *Справочник по пыли- и золоулавливанию*. Русанов А.А., ред. Москва, Энергоатомиздат, 1983, 312 с.
- [11] Маслов В.Е. *Исследование механизма сепарации твердых взвешенных частиц из изотермического циклонного потока на пленку вязкой жидкости*. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 1959. 212 с.
- [12] Иванов Е.М. *Исследование движения и сепарация твердых частиц в циклонных топочных камерах и скрубберах золоуловителей*. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Алма-Ата, 1976, 19 с.
- [13] Маслов В.Е. *Пылеконцентраторы в топочной технике*. Москва, Энергия, 1977, 207 с.
- [14] *Исследование в стендовых условиях золоуловителя с прямоточными горизонтальными циклонными элементами. Отчет по НИР*. ЦКТИ, Кирпичев Е.Ф., рук., инв. № 068201. Ленинград, 1963, 214 с.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Андреев Е.А., Бобров А.Н., Максимов С.Ф.. Проблемы сепарации высокотемпературного многофазного потока и схемы сепарирующих устройств. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/702.html>

Андреев Евгений Александрович родился в 1961 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1984 г.; канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; область научных интересов — рабочие процессы в ракетных двигателях. e-mail: aea-704@mail.ru

Бобров Александр Николаевич родился в 1961 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1984 г.; канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; область научных интересов — рабочие процессы в ракетных двигателях. e-mail: alexbobr@mail.ru

Максимов Станислав Федорович родился в 1941 г.; канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; область научных интересов — исследование турбонасосных агрегатов ракетных двигателей. e-mail: maxsimov.s@mail.ru