

А. Р. БАЕВ¹, д-р техн. наук

А. В. ВОРОБЕЙ²

М. В. АСАДЧАЯ¹, канд. техн. наук

Н. В. ДЕЛЕНКОВСКИЙ¹, канд. техн. наук

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

²ОАО «БЕЛГАЗСТРОЙ» - управляющая компания холдинга» (Минск, Беларусь)

ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В ТЕЛАХ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ И СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМОЙ

Аннотация. Развита предложенный нами метод контроля объектов с цилиндрической и сферической поверхностью путем дистанционного возбуждения в них поверхностных вращающихся мод и их прием ультразвуковыми (контактными) преобразователями. Проанализирован акустический тракт и представлены новые опытные данные об акустических параметрах поверхностных вращающихся мод, зависящих от их рабочей частоты, геометрии объекта, поверхностной структуры объекта, включая наличие трещин разной ориентации.

Ключевые слова: поверхностные вращающиеся моды (ПВМ), угловое волновое число, трещины

Повышение эффективности акустической диагностики твердотельных объектов с криволинейной поверхностью, имеющих, например, форму цилиндра, сферы и др. является актуальной производственной задачей. В частности, значительный интерес представляют задачи контроля поверхностной структуры значительного числа объектов промышленного производства объектов. Для этой цели нашли применение, как правило, контактные методы и средства акустического контроля, основанные на возбуждении поверхностных акустических волн (ПАВ), по данным амплитудных, спектральных характеристик, а также скорости ультразвуковых волн, представляется возможным выявлять микроповрежденность металла, глубину упрочненного слоя, трещины и др. [1]. Для этих целей могут применяться и другие – бесконтактные и комбинированные методы, основанные как непосредственно на ЭМА-эффекте, так и оптико-акустических методиках [1]. Однако, применение последних ограничено рядом факторов, включая свойства материала и требования к состоянию поверхности объекта и др. В случае же использования традиционных контактных способов [1] процесс контроля может усложниться, если объект имеет достаточно высокую температуру, ограниченный доступ к нему и другими факторами, а также требуется высокая производительность контроля.

Для решения подобных задач нами ранее [2, 3] был предложен способ «дистанционного» контроля указанных объектов поверхностными вращающимися модами (ПВМ), возбуждаемыми в результате трансформации части потока энергии волны Рэлея, проходящей через граничный контактный слой между стальной подложкой и исследуемым объектом контроля, имеющим форму цилиндра и сферы. При n -кратном огибании ПВМ поверхности объекта

происходит «накопление» информации о состоянии его поверхностного и подповерхностного слоя, включая физико-механические свойства, наличие дефектов и другие. При этом для характеристики состояния поверхностного слоя объекта в качестве информативных параметров может быть использовано время распространения волны Δt , амплитуда A , спектр и др. характеристики (рисунок 1) акустических сигналов.

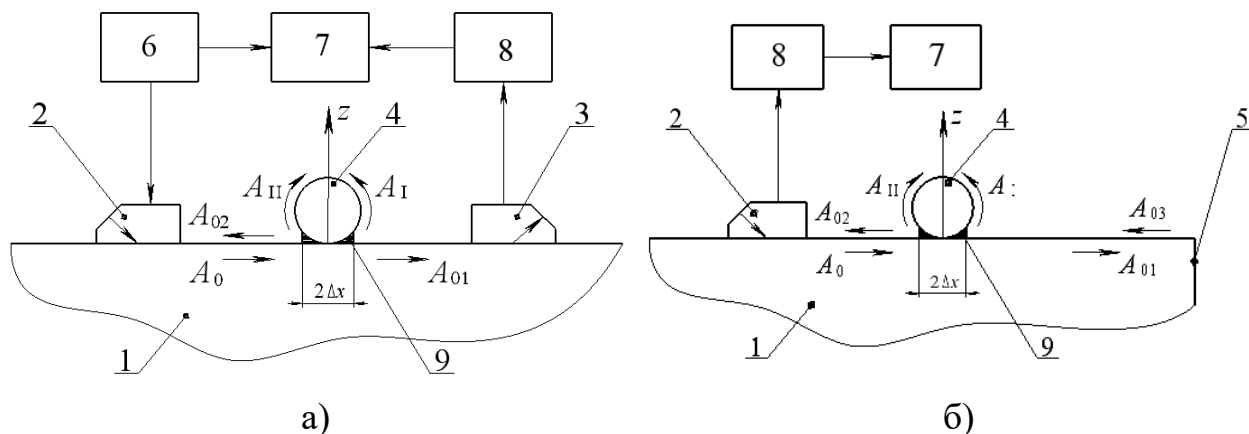


Рис.1. Пояснение к предложенному способу дистанционного контроля объектов цилиндрической (или сферической) формы, реализуемого путем использования для возбуждения-приема поверхностных волн двух (а) и одного (б) преобразователя: 1 – подложка, служащая в качестве «линии задержки»; 2 и 3 – излучающий и приемный преобразователи соответственно; 4 – объект исследования или тело акустической нагрузки цилиндрической, сферической или др. подобной формы; 5 – торец подложки, служащий в качестве отражателя или опорного сигнала поверхностных акустических волн; 6 – генератор импульсов; 7 – осциллограф; 8 – блок усиления принимаемого сигнала; 9 – жидкость, обеспечивающая акустический контакт.

Ниже рассмотрены вопросы совершенствования методики измерений и предложенного способа контроля объектов в форме цилиндра и сферы, выполненных из стали и дюралюминия, и существенно отличающиеся удельным акустическим сопротивлением практически в $\sim 2,8$ раза. В качестве исследуемых ниже и важных параметров для оптимальной реализации предложенных схем прозвучивания служит коэффициент прохождения волны Рэлея от излучающего к приемному преобразователю (ПЭП) через границу контакта подложка-объект контроля – A_{01}/A_0 , а также коэффициент их ослабления (усредненный) $K_{n,n-1}=(\sum A_n/A_{n-1})/n$, позволяет оценить потери энергии вращающейся моды в результате n -кратного прохождения ею поверхности объекта. При этом A_{01} – амплитуда импульса волны Рэлея, приходящая на приемный ПЭП от источника излучения при наличии на поверхности подложки объекта контроля, а A_0 – в отсутствие его. Этот параметр характеризует энергию, передаваемую волной Рэлея в объект контроля для возбуждения ПВМ. Что касается A_n , то это амплитуда импульса ПВМ с порядковым номером n , характеризующим количество кругового огибания акустическим импульсом исследуемой поверхности.

Приведенные на рисунке 1 схемы, могут быть использованы при контроле объектов как в режиме эхо, теновом (рис.1а), также предлагаемым комбинированным способом (рис.1б). Причем одна из схем (рис.1а, вариант I),

предназначена для сугубо теневого прозвучивания объектов, выполненных из стали и дюралюминия. Что позволяет выявлять параметры акустического тракта как в отсутствие дефектов, так и при их наличии, используя в качестве информативных амплитудные, временные и другие параметры поверхностных волн. С другой стороны, иногда может быть использован вариант измерений П как дополнительный, при котором поверхностные трещины или поры выявляются с помощью одного ПЭП, работающего в режиме эхо. При этом, в результате отражения от дефекта зондирующего импульса ПВМ приобретает вращение в обратную сторону (по часовой стрелке) и принимается источником волн Рэлея после обратного преобразования.

Необходимо обратить внимание на возможности использования комбинированной схемы прозвучивания, поясняемой рисунком 1б, для повышения чувствительности измерений и контроля поверхностных дефектов, используя режим эхо прозвучивания, но отражателем служит не сам дефект, а торец подложки. Как следует из анализа акустического тракта при реализации определенных условий, возможно повышение чувствительности метода обнаружения дефекта в результате рассеяния на нем n -го импульса ПВМ дважды – приближаясь к отражателю поверхностных волн ($\uparrow$) и обратно ($\downarrow$) – к их источнику. Так, что при реализации рассматриваемого способа обнаружения дефектов функция прохождения зондирующего сигнала $\mathcal{E}_n$ может быть представлена в виде произведения упомянутых выше коэффициентов $K_{n,n-1}^{\uparrow}$ и $K_{n,n-1}^{\downarrow}$, а также коэффициента отражения волны Рэлея от торца подложки K_R и коэффициентов ослабления ПВМ трещиной в результате рассеяния на ней – $\delta_n^{\uparrow}$ и $\delta_n^{\downarrow}$, соответственно

$$\mathcal{E}_n \sim K_R^2 D_P \prod_{n=1}^{n=n_0} K_{n,n-1}^{\uparrow} K_{n,n-1}^{\downarrow} (1 - \delta_n^{\uparrow})(1 - \delta_n^{\downarrow}), \quad (1)$$

где D_P – коэффициент трансформации волны Рэлея в ПВМ на границе подложка-объект. При реализации теневого режима прозвучивания, в выражение (1) следует подставить $\delta_n^{\downarrow} = K_{n,n-1}^{*\downarrow} = 0$, а вместо K_R – 1. Очевидно, что если используется традиционный режим эхо прозвучивания (рис.1а), то выражение (1) существенно упрощается.

Особенности экспериментального исследования. Для проведения экспериментального исследования использована преимущественно аппаратура, применяемая ранее [3]. При этом, электронная часть схемы экспериментальной установки содержит в качестве источника и приемника электрических импульсов ПАВ блоки стандартного дефектоскопа, включая генератор с частотой следования импульсов 0,5 кГц, блока их усиления с выходом как недетектированного, так и детектированного информативных сигналов на прибора RigolDS7024 с частотой выборки 200 МГц и измерения временных интервалов с погрешностью до ~ 5 нс. Рабочая частота заполнения импульсов $\nu = 1,0, 2,5$ и $5,0$ (МГц). При проведении исследований значительное внимание обращено на создание стабильного акустического контакта преобразователей, для чего использованы магнитные

насадки, а также определялись оптимальные условия для преобразования волны Рэлея в ПВМ, создавая постоянный контактный слой между объектом контроля и подложкой. Каждое измерение проводилось 3 раза. Модельные образцы с трещинами с раскрытием их устья до десятка мкм и глубиной до 0,5 – 0,8 мм выполнены путем использования специальной технологии [4].

Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунках 2 – 4. Причем на рисунках 2 и 3 впервые иллюстрируются зависимости обратного коэффициента прохождения K_d^{-1} и коэффициента ослабления поверхностных волн $K_{n,n-1}^{-1}$, измеренные теневым способом на стальных и дюралевых цилиндрах, а также стальных сферах разного радиуса. При этом диапазон варьируемого углового волнового числа, определяемого радиусом объекта R и длиной рэлеевской волны λ составляет $p = 2\pi R/\lambda = 170 - 180$. На рисунке 4 иллюстрируются некоторые возможности использования предложенного метода для выявления поверхностных трещин теневым и комбинированным методом.

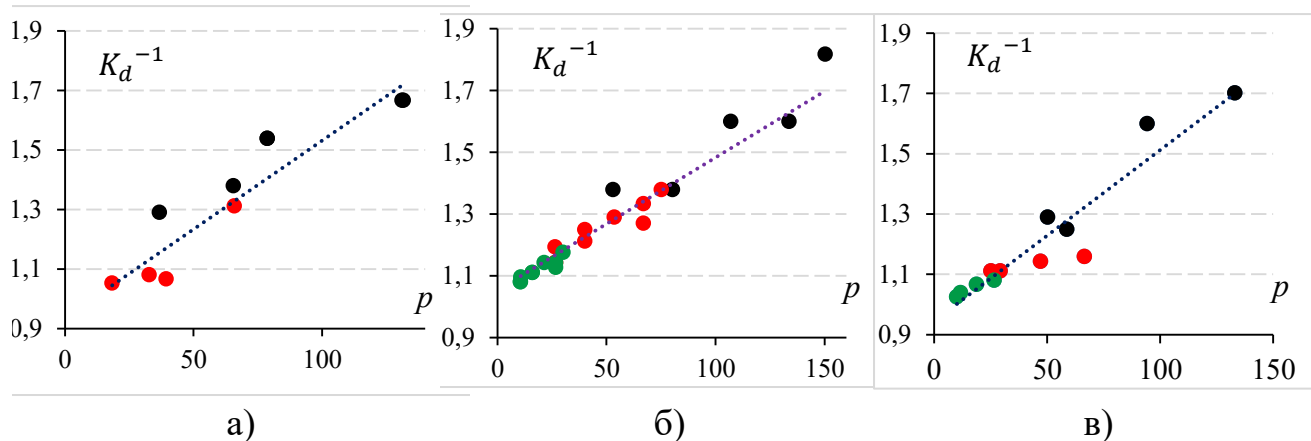


Рис.2. Зависимость обратного коэффициента прохождения K_d^{-1} волной Рэлея акустической нагрузки в виде стального (а) и дюралевого (б) цилиндров, а также стальной сферы (в), установленных на стальной подложке, от углового волнового числа $p = 2\pi R/\lambda$ при реализации теневого варианта прозвучивания на рабочей частоте f , МГц=5 (●) 2,5 (●) 1 (●) 0,5

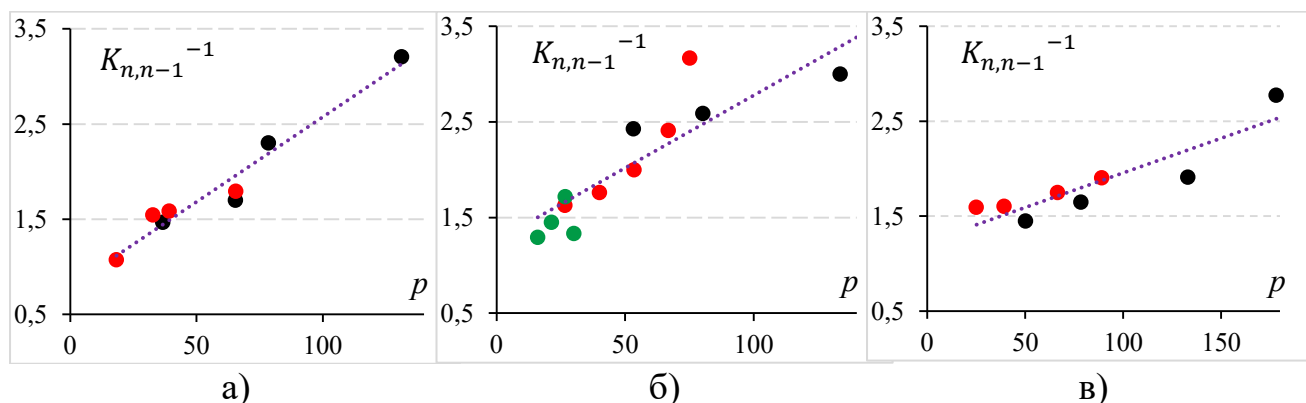


Рис.3. Зависимость обратного коэффициента ослабления волны $K_{n,n-1}^{-1}$ в виде стального (а) и дюралевого (б) цилиндров, а также стальной сферы (в), установленных на стальной подложке, от углового волнового числа $p = 2\pi R/\lambda$ при реализации теневого варианта прозвучивания на рабочей частоте: f , МГц=5 (●) 2,5 (●) 1 (●) 0,5

Как видно из проведенных экспериментальных исследований (рис.2 и 3) зависимости обратных коэффициента прохождения K_d^{-1} волной Рэлея акустической нагрузки в виде цилиндра и сферы и однократного ослабления поверхностной вращающейся модой $K_{n,n-1}^{-1}$ являются возрастающими функциями от углового волнового числа и преимущественно имеют квазилинейный вид. Как видно, чем больше угловое волновое число, то есть чем больше радиус исследуемого объекта и меньше длина ультразвуковой волны, тем меньше доля поверхностной волны в подложке пройдет область акустического контакта. Приведенное уменьшение коэффициента прохождения может быть вызвано увеличением доли энергии ПВМ.

Согласно рисунку 3, чем больше угловое волновое число, тем быстрее уменьшается регистрируемая серия импульсов ПВМ. Приведенные зависимости означают, что с увеличением радиуса образца и уменьшением длины ультразвуковой волны поверхностная вращающаяся мода большую долю энергии отдает в подложку, в виде возбуждения волны Рэлея, при каждом прохождении области акустического контакта объект-подложка. Коэффициент ослабления серии импульсов ПВМ характеризует чувствительность предложенного способа контроля и может являться критерием наличия дефектов на поверхности исследуемого объекта. Поверхностные дефекты изменяют коэффициент ослабления. Стоит отметить, что для цилиндрических и сферических образцов коэффициенты ослабления имеют один порядок и близки друг к другу, что может быть связано с преимущественным влиянием геометрии акустического контакта на формирование акустического тракта в плоскости прозвучивания (рис. 1), в которой цилиндрические и сферические образцы идентичны.

На рисунке 4 приведены А-сканы серии импульсов ПВМ при контроле стального цилиндрического образца с трещиной, расположенной вдоль оси цилиндра, тенью (рис.4 а, б) и комбинированным способами (рис.4 в, г). При теневом способе контроля, при наличии дефекта на поверхности контролируемого объекта, в зависимости от его размера, уменьшается количество регистрируемых импульсов ПВМ: 6 импульсов на бездефектном образце (рис.4 а), 4 импульса при наличии трещины (рис.4 б). Количественным показателем наличия дефектов, в этом случае, может являться коэффициент ослабления $K_{n,n-1}$, который, при этом претерпевает изменение (рис.4 а, б). При комбинированном способе часть ультразвуковой энергии возвращается к приемному ПЭП через отражения волны от дефекта, при этом наблюдается увеличение амплитуды соответствующих импульсов (импульсы 1 и 2, рисунок 4 в, г). Часть ультразвуковой волны, в зависимости от размеров дефекта, проходит через него, совершая многократные обегания. Данная серия импульсов регистрируется аналогично как при теневом способе: импульсы 4 ÷ 7 (рис. 4,в) на бездефектном образце; импульсы 4 и 5 (рис. 4,г) при наличии дефекта. Комбинированный способ совмещает как эхо, так и теневой режимы.

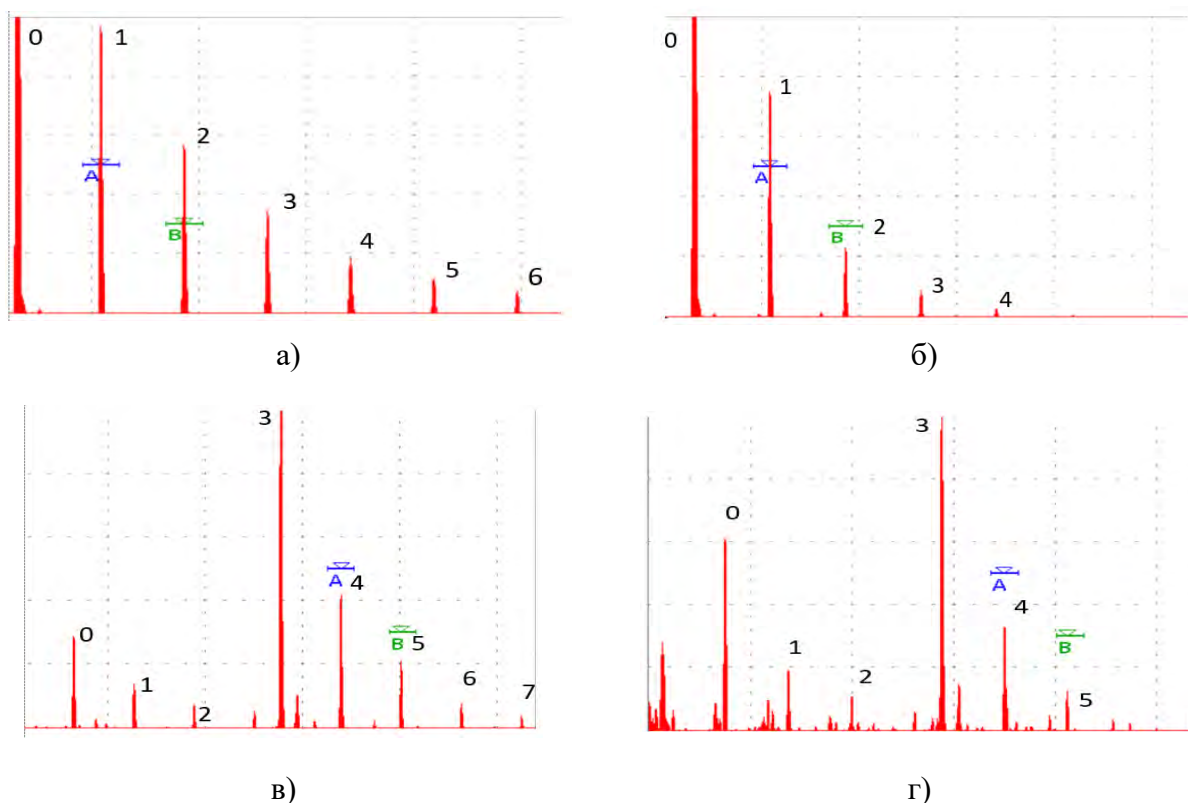


Рис.4. А-сканы результатов контроля стального цилиндра Ø10 мм с трещиной вдоль оси на частоте 2,5 МГц теньвым (а, б) и комбинированным (в, г) способами: дефект отсутствует (а, в); дефект в виде продольной трещины (б, г), где (а, б): 0 – импульс опорного сигнала A_{01} , прошедшего через акустический контакта объект-подложка; 1 ÷ 6 – номера импульсов вращающейся моды; (в, г): 0 – импульс опорного сигнала A_{02} , отраженного от области акустического контакта объект-подложка; 3 – импульс опорного сигнала A_{01} прошедшего через акустический контакт объект-подложка, отразившегося от грани подложки и вернувшегося обратно к приемному преобразователю; 1 ÷ 2 – номера импульсов вращающейся моды по часовой стрелки; (б): 4 ÷ 7 – номера импульсов вращающейся моды против часовой стрелки

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований и анализа акустического тракта предложенных схем прозвучивания объектов из стали и дюрала, имеющих цилиндрическую и сферическую форму, с целью выявления их дефектности, установлены зависимости коэффициентов прохождения волны Рэлея через границу контакта подложка-объект K_d^{-1} , а также их ослабления $K_{n,n-1}^{-1}$, вызванного совершением ПВМ одного оборота, при варьировании углового волнового числа в диапазоне $p = 10 \div 180$. Выявлен близкий к квазилинейному рост обратных значений указанных коэффициентов, что обусловлено особенностями трансформации и отражения поверхностных волн на границе контактирующих материалов, а также расхождением их волнового фронта. Причем изменение величины K_d^{-1} в указанном диапазоне углового волнового числа составляет $1,05 \div 1,80$, а $K_{n,n-1}^{-1}$, соответственно изменяется в диапазоне $1,1 \div 3,4$. Установлено, что коэффициент ослабления $K_{n,n-1}^{-1}$ может являться количественным критерием наличия дефектов на поверхности криволинейных объектов, подвергаемых контролю. При определенных условиях для повышения чувствительности контроля поверхностных дефектов, включая,

например, трещины, поры, эффективен комбинированный способ контроля, реализующий эхо режим прозвучивания, где в качестве отражателя опорного сигнала служит оппозитный торец подложки. Это позволяет практически в 2 раза увеличить акты взаимодействия поверхностной вращающейся моды с дефектом, ослабляя зондирующий сигнал. Также дистанционный ультразвуковой контроль может проводиться эхо способом – по данным отраженного непосредственно от дефекта первого импульса.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль. Справочник. под ред. В.В. Клюева, т 3. Москва: «Машиностроение», 2006. 859 с.
2. Чабанов В.Е. Лазерный ультразвуковой контроль материалов, - Л.:, изд. Наука, 1986. - 215 с
3. Баев А.Р., Воробей А.В., Деленковский Н.В. Экспериментальное исследование влияния формы тела акустической нагрузки на распространение поверхностных волн // Санкт-Петербург. – Тезисы докладов «Методология ультразвукового контроля: фундамент и современная надстройка». 2025. – С.121-123.
4. Baev A.R., Vorobei A.V., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Delenkovsky N.V. Distant Excitation of Rotating Surface Waves in Bodies with Cylindrical and Spherical Surface as Applied to Ultrasonic Control. Devices and Methods of Measurements, 2025; № 2(16): 106-120.
5. Деленковский Н.В., Гнусин А.Б. Контрольные образцы для капиллярной дефектоскопии // Дефектоскопия. - 2024. - №2. - С. 43-48.

Контакты:

baev@iaph.bas-net.by (Баев Алексей Романович);
vorobey@belgazstroy.by (Воробей Алексей Васильевич);
asadchaya@iaph.bas-net.by (Асадчая Мария Владимировна);
delenkovskij@iaph.bas-net.by (Деленковский Николай Владимирович)