

Оценка возможности контроля болтового соединения крышек сосудов с помощью ультразвуковых волн

А. В. Костерина[✉], А. В. Теплякова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] anna.vkosterina@gmail.com

Аннотация. Исследовалась применимость акустического метода контроля ослабления крепежа на крышках сосудов, основанного на изменении амплитуды сигнала при отражении и прохождении ультразвуковых волн через границу раздела сред. Были получены теоретические зависимости изменения амплитуды принятого сигнала при изменении приложенного давления для случая фланцевого соединения без дополнительной прокладки и при наличии прокладки, выполненной из различных материалов. Установлено, что при отсутствии акустического контакта во фланцевом соединении амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела, максимальна, при сплошном контакте – минимальна. Полученные результаты были проверены экспериментально с помощью эхо- и теневого методов ультразвукового контроля. В результате исследования было установлено, что максимальное изменение амплитуды сигнала наблюдается на низких частотах, и при контроле теневым методом оно выше, чем при использовании эхо-метода.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, изменение амплитуды, контактное давление

Для цитирования: Костерина А. В., Теплякова А. В. Оценка возможности контроля болтового соединения крышек сосудов с помощью ультразвуковых волн // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 10. С. 33–42. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-10-33-42.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Evaluation of the Possibility of Controlling the Bolted Joints of Vessel Lids Using Ultrasonic Waves

A. V. Kosterina[✉], A. V. Teplyakova

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

[✉] anna.vkosterina@gmail.com

Abstract. The aim of the work is to study the applicability of the acoustic method for monitoring the loosening of fasteners on vessel lids, based on the change in signal amplitude during reflection and transmission of ultrasonic waves through the interface between plates. In the course of the work, theoretical dependences of the change in the amplitude of the received signal with a change in the applied pressure were obtained for the case of a flange connection without an additional gasket and in the presence of a gasket made of various materials. It has been established that in the absence of acoustic contact in the flange connection, the amplitude of the signal reflected from the interface is maximum, while in continuous contact it is minimal. The results obtained were verified experimentally using the shadow and echo method of ultrasonic testing. As a result of the study, it was found that the maximum change in the signal amplitude is observed at low frequencies, and when controlled by the shadow method, it is higher than when using the echo method.

Keywords: ultrasonic testing, reflection coefficient, transmission coefficient, amplitude change, contact pressure

For citation: Kosterina A. V., Teplyakova A. V. Evaluation of the Possibility of Controlling the Bolted Joints of Vessel Lids Using Ultrasonic Waves // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 10. P. 33–42. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-10-33-42.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Неразрушающий контроль играет важную роль в производстве, энергетике, строительстве и других сферах, связанных с эксплуатацией различного промышленного оборудования. Примером такого оборудования могут служить сосуды, работающие под давлением, – они используются практически повсеместно и предназначены для ведения различных технологических процессов. Производственные объекты, на которых находятся и работают сосуды под давлением, относятся к опасным, и для предотвращения несчастных случаев элементы сосудов необходимо своевременно обследовать неразрушающими методами.

Для проведения наиболее полного и достоверного контроля технического состояния металлических конструкций требуется постоянное совершенствование существующих и разработка новых методов дефектоскопии, которые могут быть применены в условиях производства для обеспечения безопасности объектов промышленности.

В процессе эксплуатации материалы технических устройств подвержены пластическим деформациям, изменению структуры и прочностных характеристик, старению и другим явлениям в зависимости от характера внешнего воздействия. Сосуды, работающие под давлением, могут быть подвержены повышенным уровням вибрации, перепадам давления внутренней среды, эксплуатации на предельных параметрах, превышающих рабочие, и т. д.

К конструктивным элементам, наиболее подверженным влиянию негативных факторов, относятся детали крепления крышки сосудов – болты и шпильки. Высокий уровень стационарных, нестационарных, случайных вибраций может привести к самопроизвольному отвинчиванию элементов крепежа, при достижении пределов прочности и текучести под действием внешних усилий происходит повреждение и поломка крепежных деталей, что в определенных условиях может стать причиной аварии.

Болтовое соединение с деформированными или разрушенными болтами не обеспечивает необходимую плотность контакта между крышкой сосуда и его корпусом. Разгерметизация сосуда, работающего под давлением, создает опасность разрушения

оборудования, а также поражения обслуживающего персонала химически опасными веществами.

Существуют различные методы неразрушающего контроля, направленные на исследование технического состояния крепежных элементов. Для этой цели применяются акустические методы: метод акустической эмиссии [1]; метод акустической тензометрии [2], основанный на измерении удлинения болтов с помощью ультразвуковых волн, и др. Также существуют способы оценки приложенного крутящего момента с помощью специальных ключей, позволяющих отслеживать отвинчивание.

Большинство известных методов имеют ряд недостатков, ограничивающих их повсеместное использование. Наиболее существенно применимость этих способов ограничивается только для контроля каждого отдельного болта, что усложняет их реализацию и делает экономически невыгодными.

Чтобы снизить количество датчиков, необходимое для проведения контроля, стоит перейти от контроля напряженно-деформированного состояния отдельных болтов к отслеживанию нарушения контакта между корпусом и крышкой сосуда.

В данной статье будет предложен акустический метод контроля силы сцепления фланцевого соединения, предполагающий установку датчиков непосредственно на поверхность металла крышки и основанный на взаимодействии ультразвуковой волны с поверхностью соприкосновения двух сред.

Граничные условия при нарушении качества контакта. При рассмотрении контакта элементов фланцевого соединения в микромасштабе видно, что соприкосновение двух поверхностей происходит на вершинах неровностей, вокруг которых расположены воздушные зазоры. Схематичное изображение такого контакта показано на рис. 1, *a* [3].

Энергия ультразвуковой волны, падающей на микрошероховатую границу раздела двух твердых сред, частично проходит через контакты неровностей во второе тело, а частично отражается от полостей, заполненных воздухом (рис. 1, *б*). На рис. 1, *в* и *г* представлено изображение пружинной модели, описанной в [4], где предлагается рассматривать каждый шероховатый контакт как отдельную пружину с жесткостью K .

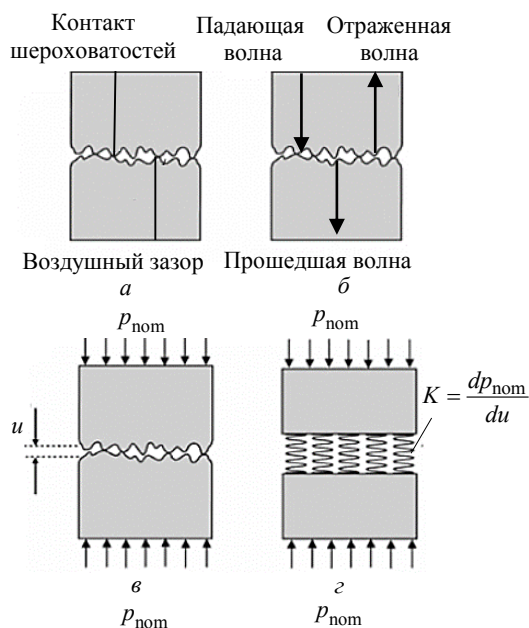


Рис. 1. Поверхность соприкосновения двух твердых сред: *а* – контакты шероховатостей, *б* – прохождение и отражение ультразвука, *в* – приложенное внешнее давление, *г* – модель пружины

Fig. 1. The interface between two rough surfaces: *a* – joints of irregularities, *б* – transmission and reflection of ultrasound, *в* – pressure applied to the surfaces, *г* – spring model

Жесткость K такой пружины зависит от давления $p_{\text{ном}}$, с которым две поверхности прижимаются друг к другу, и выражается следующим образом: $K = dp_{\text{ном}}/du$, где u – расстояние между средними линиями шероховатости двух поверхностей.

С межфазной жесткостью связан коэффициент отражения, и для случая контакта двух одинаковых материалов их соотношение выглядит следующим образом:

$$|R| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2K}{\omega z}\right)^2}}, \quad (1)$$

где ω – угловая частота ультразвуковой волны, а z – акустический импеданс (произведение скорости волны и плотности материала) через границу раздела сред.

Пружинная модель может быть применена для случая отражения ультразвуковых волн с частотой до 50 МГц [5].

Для подтверждения пружинной теории по (1) была рассчитана зависимость амплитуды сигнала, отраженного от границы раздела сред. Нормированная зависимость амплитуды от контактного давления представлена на рис. 2.

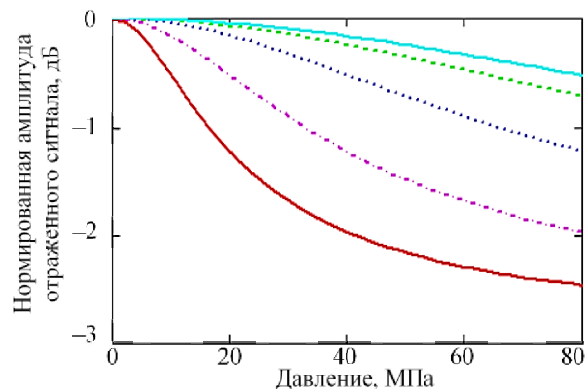


Рис. 2. Нормированная амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела, на частотах, МГц: — 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10, при увеличении давления на поверхности

Fig. 2. Normalized amplitude of the signal reflected from the interface at frequencies, MGz: — 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10, with increasing pressure on the surface

Как видно из рис. 2, амплитуда отраженного сигнала сильно зависит от силы сцепления двух поверхностей. Отраженный сигнал изменяется вследствие деформирования шероховатых контактов под действием приложенного давления и усиления плотности прилегания двух поверхностей. Площадь контакта увеличивается, и часть энергии ультразвуковой волны начинает проникать во вторую среду, что влечет за собой ослабление отраженного сигнала. При этом падение сигнала близко к линейному и может служить критерием для оценки степени сжатия поверхностей.

В случае полного разделения двух тел, т. е. когда отсутствует внешнее давление, амплитуда отраженного сигнала не меняется, т. е. звуковая волна не проходит через границу двух сред и происходит полное отражение.

Согласно представленной зависимости описываемые явления наиболее выражены на низких частотах, так как на них наблюдается более резкое и сильное изменение коэффициента отражения. Однако при увеличении внешнего давления максимальное ослабление сигнала составляет около 2 дБ, что может быть трудно различимо в условиях контроля реальных производственных объектов.

При уменьшении амплитуды отраженного сигнала амплитуда прошедшего сигнала должна возрастать. Это утверждение вытекает из закона сохранения энергии, связывающего коэффициенты отражения и прохождения: $R^2 + D^2 = 1$, где D – коэффициент прохождения. Нормированная зависимость амплитуды прошедшего сигнала от контактного давления показана на рис. 3.

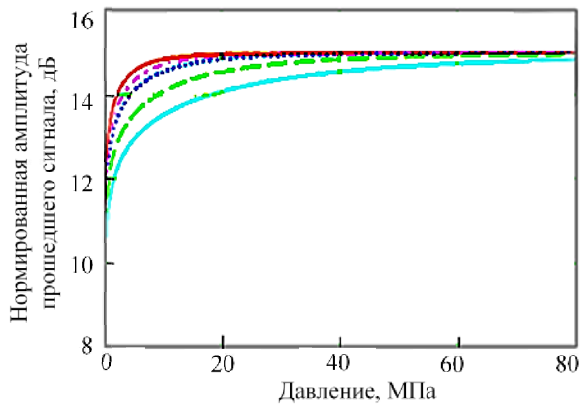


Рис. 3. Нормированная амплитуда сигнала, прошедшего через границу раздела на частотах, МГц:
— 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10,
при увеличении давления на поверхности
Fig. 3. Normalized amplitude of the signal transmitted through the interface with increasing pressure on the surface at frequencies, MGz:
— 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10

Из рисунка видно, что, в отличие предыдущего графика, зависимость имеет нелинейный характер и насыщение. На высоких частотах происходит более плавный выход кривой в зону насыщения, на низких переход осуществляется скачком, при этом амплитуда насыщения выше.

Как и предполагалось, амплитуда прошедшего сигнала при увеличении контактного давления возрастает. Это вызвано тем, что чем сильнее сжаты друг с другом две поверхности, тем лучше акустический контакт между ними, и звуковая волна беспрепятственно проходит во второе тело.

Рассмотренный вариант определения коэффициента отражения и амплитуды сигнала справедлив для контакта элементов фланцевого соединения без прокладки из другого материала между ними. При сжатии двух поверхностей с прослойкой между ними следует учитывать изменение акустического импеданса, который зависит от скорости распространения продольной волны и плотности материала. В монографии Л. М. Бреховских [6] описано отражение плоских волн от слоя, разделяющего две однородные среды. Коэффициент отражения в случае, когда среды по обе стороны слоя одинаковы, находится следующим образом:

$$R = \frac{Z_2^2 - Z_1^2}{Z_1^2 + Z_2^2 + 2Z_1Z_2 \operatorname{ctg}^2(k_2d)}, \quad (2)$$

где $Z_1 = c_1\rho_1$, $Z_2 = c_2\rho_2$ – акустические импедансы первой и второй сред соответственно, c – скорость продольной волны в материале, ρ – плотность материала; $k_2 = 2\pi f/c$ – волновое число; f – частота; d – толщина слоя.

Объединяя выражения (1) и (2), получаем формулу для расчета коэффициента отражения ультразвуковой волны от границы раздела «фланец–прокладка». При этом коэффициент отражения будет зависеть от давления, с которым поверхности прижимаются друг к другу.

В качестве материалов прослойки были выбраны медь и паронит, так как они наиболее часто применяются на практике для уплотнения фланцевых соединений.

Нормированная зависимость от приложенной нагрузки амплитуды сигнала, отраженного от границ «сталь–медь–сталь» и «сталь–паронит–сталь», представлена на рис. 4 и 5.

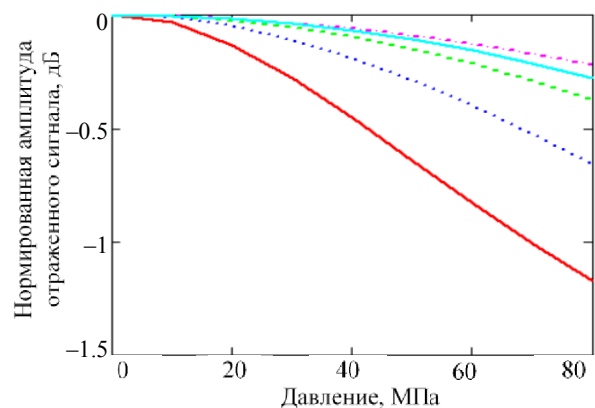


Рис. 4. Нормированная амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела «сталь–медь–сталь», на частотах, МГц:
— 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10,
при увеличении давления на поверхности
Fig. 4. Normalized amplitude of the signal reflected from the steel–copper–steel interface with increasing pressure on the surface at frequencies, MGz:
— 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10

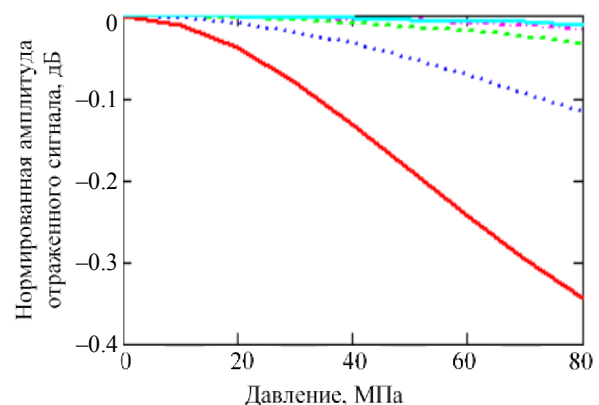


Рис. 5. Нормированная амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела «сталь–паронит–сталь» при увеличении давления на поверхности на частотах, МГц:
— 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10
Fig. 5. Normalized amplitude of the signal reflected from the steel–paronite–steel interface with increasing pressure on the surface at frequencies, MGz:
— 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10

Как видно из рис. 4 и 5, при наличии прокладки между стальными элементами амплитуда отраженного сигнала от границы раздела убывает, как и при отсутствии прокладки. Наибольшее изменение амплитуды наблюдается на низких частотах.

Изменения амплитуды сигнала, прошедшего через уплотнительный слой из меди и паронита, представлены на рис. 6 и 7.

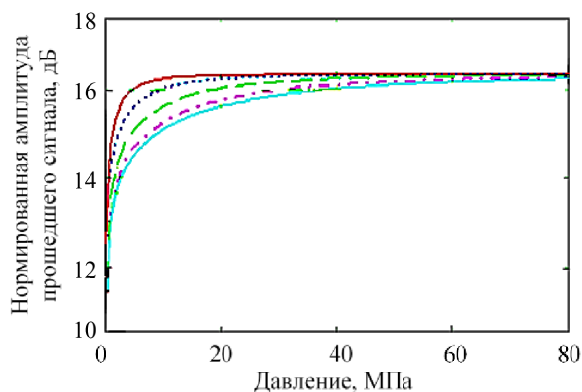


Рис. 6. Нормированная амплитуда прошедшего через границу «сталь–медь–сталь» сигнала на частотах, МГц: — 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10, при увеличении контактного давления

Fig. 6. Normalized amplitude of the transmitted signal through the steel–copper–steel interface at frequencies, MGz: — 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10, with increasing contact pressure

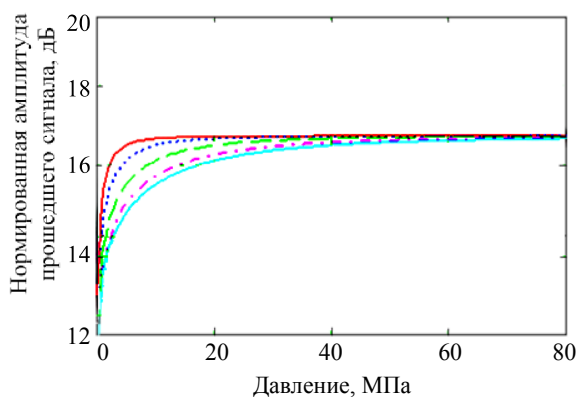


Рис. 7. Нормированная амплитуда прошедшего через границу «сталь–паронит–сталь» сигнала на частотах, МГц: — 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10, при увеличении контактного давления

Fig. 7. Normalized amplitude of the transmitted signal through the steel–paronite–steel interface at frequencies, MGz: — 1.25; 1.8; --- 2.5; - - - 5; — 10, with increasing contact pressure

Как видно из рис. 6 и 7, при наличии прокладки между стальными пластинами изменение амплитуды происходит, как и в случае их отсутствия.

Как показали теоретические расчеты, в одинаковых условиях амплитуда прошедшего через границу раздела сред сигнала выше, чем отраженного. Чтобы зафиксировать изменение амплитуды, могут быть использованы разные методы акустического

контроля, имеющие свои преимущества и недостатки при использовании в реальных условиях. Экспериментальным путем предстоит определить наиболее информативный способ для отслеживания ослабления контакта двух поверхностей.

Экспериментальные исследования эхо-методом. Эхо-метод ультразвукового контроля основан на генерации преобразователем ультразвуковых колебаний, посылаемых в объект контроля, и последующем приеме отраженных от дефектов и несплошностей импульсов.

Для экспериментальных исследований применимости эхо-метода при контроле сцепления элементов фланцевого соединения две стальные пластины сжимались друг с другом с помощью пресса. Максимальное давление, создаваемое прессом, – 80 МПа, материал пластин – сталь 3. Схематичное изображение взаимного расположения пластин и преобразователя для проведения контроля представлено на рис. 8.



Рис. 8. Схема проведения измерений эхо-методом
Fig. 8. Scheme of carrying out measurements by the echo method

Цифрами I и II на рис. 8 обозначены импульсы, отраженные от границы раздела двух пластин и от нижней грани второй пластины соответственно.

Значение ослабления эхо-сигнала, полученное в результате теоретических расчетов, составило от 0 до 2 дБ. Чтобы зафиксировать такое изменение амплитуды, требуется обеспечить точность измерений порядка 0.01 дБ, поэтому для регистрации эхо-сигналов и измерения их амплитуды был выбран ультразвуковой дефектоскоп «Пеленг» УДЗ-204, удовлетворяющий этому условию.

Полученное в ходе эксперимента изменение амплитуды сигнала, отраженного от границы раздела пластин, на разных частотах представлено на рис. 9.

Как видно из рис. 9, с увеличением контактного давления амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела, снижается, что и было предположено в результате теоретических расчетов. На высоких частотах изменения сигнала практически не наблюдается, с уменьшением частоты

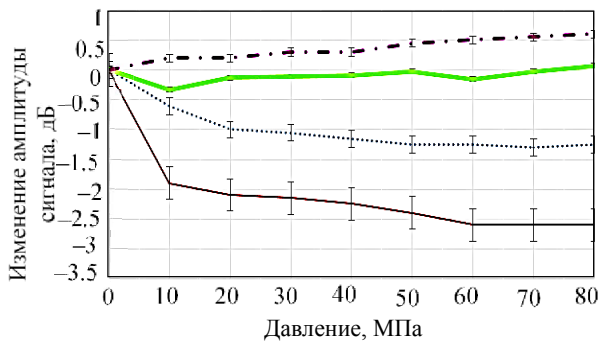


Рис. 9. Нормированное изменение амплитуды сигнала, отраженного от границы раздела, на частотах, МГц:

Fig. 9. Normalized change in the amplitude of the signal reflected from the interface at different frequencies, MGz:

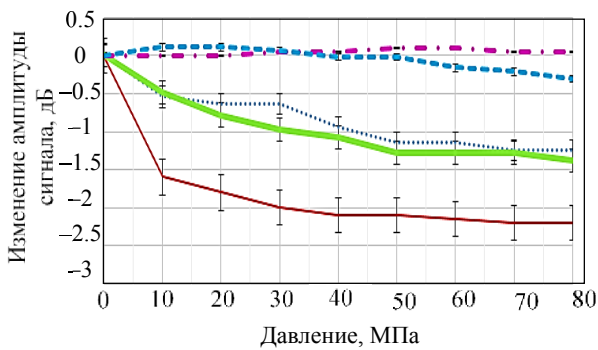


Рис. 10. Нормированное изменение амплитуды сигнала, отраженного то границы раздела, на частотах, МГц:

Fig. 10. Normalized change in the amplitude of the signal reflected then the interface at frequencies, MGz: in the presence of a contact liquid between the plates

ослабление проявляется наиболее явно: на частоте 1.25 МГц ослабление составило 2.5 дБ.

На реальных объектах на фланцевые соединения часто наносится герметизирующий слой, который в условиях эксперимента можно имитировать с помощью контактной жидкости. Жидкость наносилась на поверхность между двумя пластинами, после чего были проведены аналогичные измерения. Результаты эксперимента с использованием контактной жидкости в виде ультразвукового геля представлены на рис. 10, на котором показано, что так же, как и без контактной жидкости, ослабление амплитуды на низких частотах сильнее, чем на высоких. В то время как на высоких частотах изменение амплитуды настолько незначительно, что его можно отнести к погрешности измерений, максимальное ослабление на низких частотах составило около 2 дБ.

В следующей серии экспериментов между стальными пластинами была помещена медная

фольга, имитирующая медную прокладку во фланцевом соединении. Толщина медного слоя составила 0.3 мм. Изменение амплитуды сигнала, отраженного от границы раздела «сталь–медь–сталь», представлено на рис. 11.

Аналогичные измерения проведены после нанесения контактной жидкости на медную фольгу. Их результаты представлены на рис. 12.

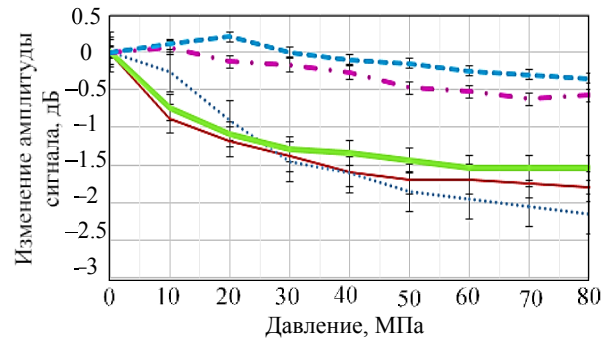


Рис. 11. Нормированное изменение амплитуды сигнала, отраженного от медного слоя на частотах, МГц:

Fig. 11. Normalized change in the amplitude of the signal reflected from the copper layer at frequencies, MGz:

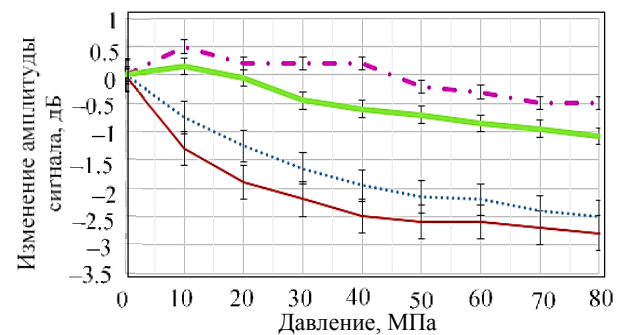


Рис. 12. Нормированное изменение амплитуды сигнала, отраженного от медного слоя, на частотах, МГц:

Fig. 12. Normalized change in the amplitude of the signal reflected from the copper layer at frequencies, MGz:

in the presence of a contact liquid between steel and copper

По рис. 11 и 12 видно, что при наличии медной фольги сохраняется та же закономерность, что и в измерениях с использованием только стальных пластин: ослабление амплитуды происходит в пределах от 1 до 3 дБ, максимальное ослабление наблюдается на низких частотах.

Все проведенные эксперименты по исследованию применения эхо-метода для контроля ослабления степени сжатия двух поверхностей показали, что чем ниже частота, тем более резко ослабевает сигнал при меньших давлениях. При этом во всех случаях амплитуда импульсов снижается до определенного уровня и достигает насыщения.

Чтобы обеспечить прохождение ультразвука высокой частоты через границу раздела сред и зафиксировать достаточно информативное ослабление сигнала, необходимо создать еще большее контактное давление, однако максимально возможное давление было ограничено условиями эксперимента.

На давлениях от 0 до 80 МПа наличие слоя контактной жидкости между пластинами не оказало существенного влияния на амплитуду отраженного от границы раздела сигнала. Однако наличие геля обеспечило достаточный акустический контакт для фиксации эхо-сигнала, отраженного от нижней границы второй пластины. В противном случае импульс не проходит через границу раздела и отраженный сигнал не фиксируется над уровнем шумов. Изменения амплитуды сигнала, отраженного от дна нижней пластины, представлены на рис. 13.

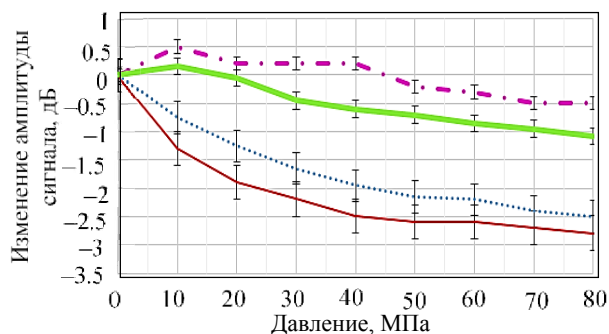


Рис. 13. Нормированное изменение амплитуды второго сигнала на частотах, МГц:

при наличии контактной жидкости между пластинами
Fig. 13. Normalized change in the back signal amplitude at frequencies, MGz:

in the presence of a contact liquid between the plates

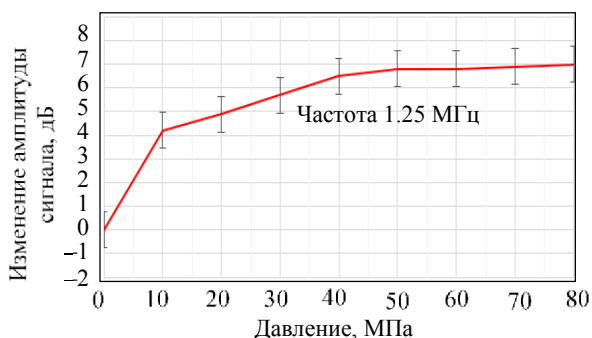


Рис. 14. Нормированное изменение амплитуды донного сигнала при наличии медной фольги и контактной жидкости между пластинами

Fig. 14. Normalized change in the amplitude of the aftermath signal in the presence of copper foil and couplant between the plates

Второй сигнал был зафиксирован и в ходе эксперимента в присутствии медной фольги с нанесенной на нее контактной жидкостью. Изме-

ренные значения амплитуды донного сигнала представлены на рис. 14.

Донный сигнал был зафиксирован только на низких частотах, так как обеспеченного усилия сжатия недостаточно для двукратного прохождения ультразвуковой волны через границу раздела сред.

Таким образом, по изменению амплитуды первого и второго сигналов на низких частотах можно определить ослабление контакта двух поверхностей.

Экспериментальные исследования теневым методом. Теневым методом предполагается использование двух преобразователей, находящихся по разные стороны объекта контроля. Один из преобразователей, в данном случае установленный сверху, генерирует колебания, второй – принимает. Информативным параметром при исследовании теневым методом служит ослабление амплитуды импульса, проходящего от излучателя к приемнику. Схематичное расположение датчиков на пластинах показано на рис. 15.

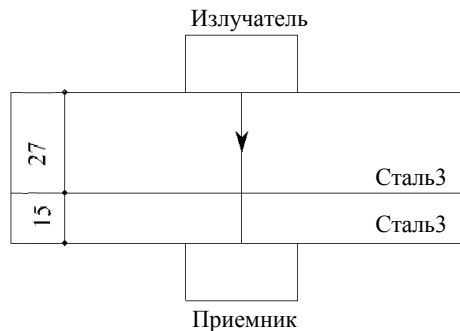


Рис. 15. Схема проведения измерений теневым методом

Fig. 15. Scheme of carrying out measurements by the shadow method

Методика измерений и объект контроля остались такими же, как и при контроле эхо-методом.

Результаты экспериментов показаны на рис. 16 и 17.

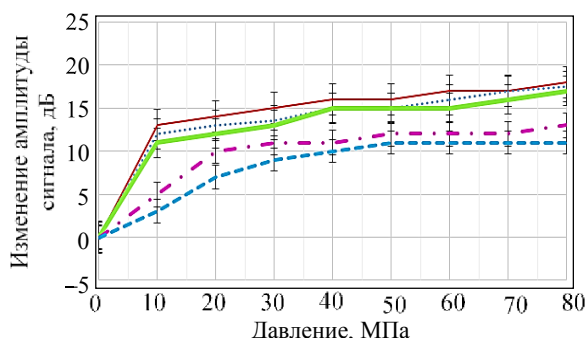


Рис. 16. Нормированное изменение амплитуды принятого сигнала на частотах, МГц:

Fig. 16. Normalized change in the amplitude of the received signal at frequencies, MGz:

— 1.25; 1.8; — 2.5; - - - - 5; - - - - 10

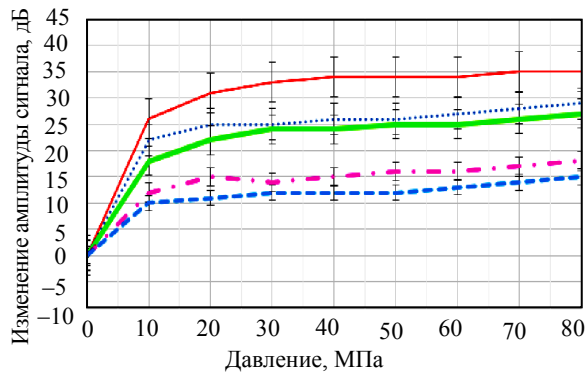


Рис. 17. Нормированное изменение амплитуды принятого сигнала на частотах, МГц: — 1.25; — 1.8; — 2.5; - - - - 5; - - - - 10, при наличии контактной жидкости между пластинами
Fig. 17. Normalized change in the amplitude of the received signal at frequencies, MGz: — 1.25; — 1.8; — 2.5; - - - - 5; - - - - 10, in the presence of couplant between the plates

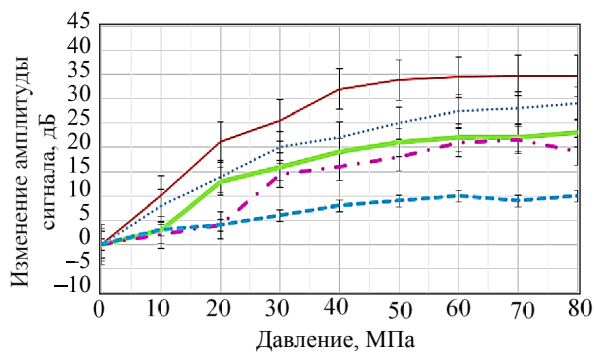


Рис. 18. Нормированное изменение амплитуды принятого сигнала на частотах, МГц: — 1.25; — 1.8; — 2.5; - - - - 5; - - - - 10, при наличии медной фольги между пластинами
Fig. 18. Normalized change in the amplitude of the received signal at frequencies, MGz: — 1.25; — 1.8; — 2.5; - - - - 5; - - - - 10, in the presence of copper foil between the plates

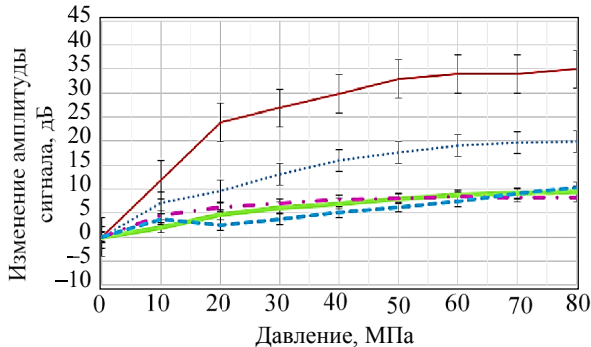


Рис. 19. Нормированное изменение амплитуды принятого сигнала на частотах, МГц: — 1.25; — 1.8; — 2.5; - - - - 5; - - - - 10, при наличии медной фольги и контактной жидкости между пластинами
Fig. 19. Normalized change in the amplitude of the received signal at frequencies, MGz: — 1.25; — 1.8; — 2.5; - - - - 5; - - - - 10, in the presence of copper foil and couplant between the plates

Как видно из рис. 16 и 17, при контроле теньвым методом изменение амплитуды существенно

выше, чем при использовании эхо-метода. Но закономерности изменения амплитуды остаются неизменными: максимальное усиление наблюдается на низких частотах, на всех частотах кривые выходят в насыщение, при этом ниже частота, тем более резко происходит изменение.

В первой серии измерений без использования контактной жидкости максимальное усиление сигнала примерно одинаково для частот от 1.25 до 2.5 МГц и составляет 17 дБ.

Зависимость, полученная в результате проведения измерений с нанесенным на поверхности гелем, более наглядно демонстрирует разницу в амплитуде на высоких и низких частотах. При этом увеличение амплитуды на частоте 1.25 МГц значительно возросло и составило 35 дБ. На высоких частотах усиление составило 10 дБ и более, что также позволяет говорить об ослаблении контакта.

Результаты измерения амплитуды прошедшего сигнала при наличии медной прокладки между металлическими пластинами представлены на рис. 18 и 19.

Как видно из рисунков, при наличии медной фольги максимальное усиление сигнала по-прежнему составляет около 35 дБ, как с контактной жидкостью, так и без нее. Максимальное усиление наблюдается на низких частотах: 1.25 и 1.8 МГц. На более высоких частотах амплитуда изменяется менее резко, усиление составляет 10 дБ и выше, следовательно, можно говорить о хорошей информативности теневого метода при контроле соединений, состоящих из разных материалов.

Чтобы это подтвердить, была проведена серия измерений амплитуды сигнала при наличии другого материала между стальными пластинами – паронита. Результаты измерения амплитуды прошедшего сигнала при наличии паронитовой прокладки толщиной 1 мм, представлены на рис. 20 и 21.

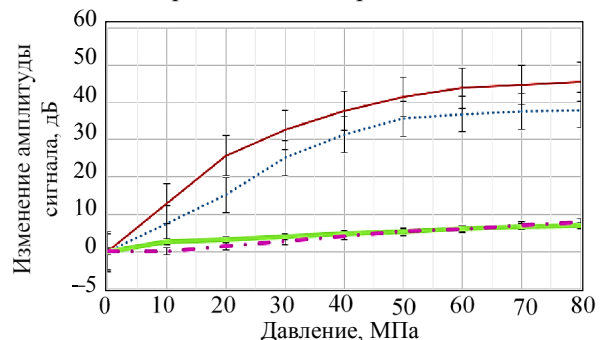


Рис. 20. Нормированное изменение амплитуды принятого сигнала на частотах, МГц: — 1.25; — 1.8; — 2.5; - - - - 5; - - - - 10, при наличии прокладки из паронита между пластинами
Fig. 20. Normalized change in the amplitude of the received signal at frequencies, MGz: — 1.25; — 1.8; — 2.5; - - - - 5; - - - - 10, in the presence of a paronite gasket between the plates

По этим рисункам видно, что при наличии паронитового слоя с увеличением контактного давления наблюдается усиление сигнала. Амплитуда растет и достигает насыщения, при этом максимальное увеличение амплитуды наблюдается на низких частотах и составляет 45 дБ на частоте 1.25 МГц и 39 дБ на частоте 1.8 МГц. С увеличением частоты происходит резкое снижение усиления сигнала, так как слоистая структура паронита препятствует прохождению волн высокой частоты из первой стальной пластины во вторую. На частотах 5 и 10 МГц усиление составляет от 5 до 10 дБ.

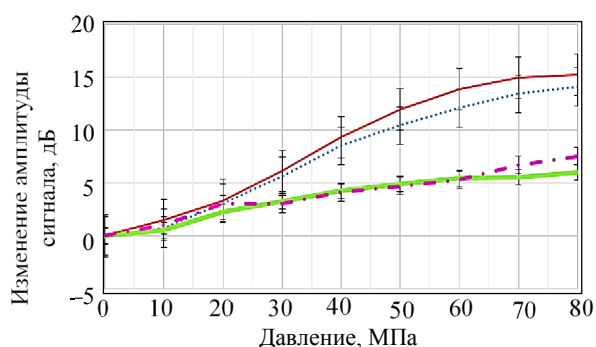


Рис. 21. Нормированное изменение амплитуды принятого сигнала на частотах, МГц:
— 1.25; — 1.8; — 5; - - - - 10,
при наличии прокладки из паронита между
пластинами и контактной жидкости

Fig. 21. Normalized change in the amplitude
of the received signal at frequencies, MGz:
— 1.25; — 1.8; — 5; - - - - 10,
in the presence of a paronite gasket between
the plates and a couplant

Сравнивая с теоретическими результатами, можно сделать вывод, что характер изменения амплитуды прошедшего сигнала весьма схож с ними, что подтверждает правильность теоретических расчетов.

Заключение. В статье проведена оценка возможности контроля ослабления контакта элементов фланцевого соединения с помощью акустических методов.

Рассчитаны теоретические зависимости изменения амплитуды принятого сигнала при изменении приложенного давления для случая фланцевого соединения без дополнительной прокладки и при наличии прокладок, выполненных из различных материалов.

Полученные результаты проверены экспериментально теньвым и эхо-методом акустического контроля. Во всех рассмотренных случаях амплитуда импульсов изменяется до определенного уровня и достигает насыщения при больших значениях контактного давления. При контроле обоими методами на низких частотах наблюдается наиболее резкое изменение сигнала при меньших давлениях, также на низких частотах происходит максимальное изменение амплитуды. Усиление прошедшего сигнала при контроле теньвым методом выше, чем ослабление сигнала, отраженного от границы раздела, при контроле эхо-методом. Следовательно, теньвой метод более информативен и позволяет точнее определять ослабление контакта во фланцевом соединении.

Список литературы

1. Onishi T., Mizutani Y., Mayuzumi M. Plastic region bolt tightening controlled by acoustic emission monitoring // J. Acoustic Emission. 2005. No. 23. P. 285–291.
2. Акустическая тензометрия как приложение к УД4-Т НУ-01 / В. Е. Рыльский, А. А. Покладов, В. М. Бобренко, В. Н. Сырбу, А. В. Сорокин, И. В. Чуднов // В мире неразрушающего контроля. 2006. No. 3 (33). С. 49–52.
3. Marshall M. B., Lewis R. Ultrasonic measurement of self-loosening in bolted joints // J. of Mechanical Engin. Sci. 2012. Vol. 226, no. 7. P. 1869–1884.
4. Kendal K., Tabor D. An ultrasonic study of the area of contact between stationary and sliding surfaces // Proc. of the Royal Society of London. A. Math. and Phys. Sci. 1971. no. 323. P. 321–340.
5. Drinkwater B. W., Dwyer-Joyce R. S., Cawley P. A study of the interaction between ultrasound and a partially contacting solid-solid interface // Proc. of the Royal Society of London. A. Math. and Phys. Sci. 1996. No. 451. P. 2613–2628.
6. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

Информация об авторах

Костерина Анна Викторовна – студентка гр. 3959. СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: anna.vkosterina@gmail.com

Теплякова Александра Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: smaest@mail.ru

References

1. Onishi T., Mizutani Y., Mayuzumi M. Plastic region bolt tightening controlled by acoustic emission monitoring // J. Acoustic Emission. 2005. No. 23. P. 285–291.
2. Akusticheskaja tenzometrija kak prilozhenie k UD4-T HU-01 / V. E. Ryl'skij, A. A. Pokladov, V. M. Bobrenko, V. N. Syrbu, A. V. Sorokin, I. V. Chudnov // V mire nerazrushajushhego kontrolja. 2006. No. 3 (33). S. 49–52. (In Russ.).
3. Marshall M. B., Lewis R. Ultrasonic measurement of self-loosening in bolted joints // J. of Mechanical Engin. Sci. 2012. Vol. 226, no. 7. P. 1869–1884.
4. Kendal K., Tabor D. An ultrasonic study of the area of contact between stationary and sliding surfaces // Proc. of the Royal Society of London. A. Math. and Phys. Sci. 1971. No. 323. P. 321–340.
5. Drinkwater B. W., Dwyer-Joyce R. S., Cawley P. A study of the interaction between ultrasound and a partially contacting solid-solid interface // Proc. of the Royal Society of London. A. Math. and Phys. Sci. 1996. No. 451. P. 2613–2628.
6. Brehovskih L. M. Volny v sloistyh sredah. M.: Nauka, 1973. 343 s. (In Russ.).

Information about the authors

Anna V. Kosterina – student gr. 3959 of Saint-Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: anna.vkosterina@gmail.com

Alexandra V. Teplyakova – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: smaest@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.06.2023; принята к публикации после рецензирования 02.08.2023; опубликована онлайн 19.12.2023.

Submitted 19.06.2023; accepted 02.08.2023; published online 19.12.2023.
