

Рисунок 3. Различные варианты закрепления циклонов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Палий О.М., Спиро В.Е. Анизотропные оболочки в судостроении. –Л.: Судостроение, 1977. – 392с.
2. Громыко О.В. Исследование элементов тонкостенных конструкций, образованных системой стержней, с использованием континуальной модели. – Труды МВТУ. – М., 1982, № 373, с.72-79.
3. Молчанов И.Н. Численные методы решения некоторых задач теории упругости. – Киев: Наукова думка, 1979. – 316с.
4. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций / А.В. Карамшин, В.А. Лясковец и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 376с.

УДК 620.179.16

Костюк Д.А., Кузавко Ю.А.

ОСОБЕННОСТИ ГРАНИЧНОГО ОТРАЖЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН ОТ ДИССИПАТИВНОЙ СРЕДЫ

Теоретически рассмотрено отражение непрерывных и импульсных поперечных акустических волн от границы твердого тела с диссипативной жидкостью. Показана существенная зависимость коэффициентов отражения сигнала и его фазы от значения сдвиговой вязкости диссипативной среды. Определена программными средствами форма отраженного импульсного сигнала. Приведен коэффициент прохождения акустическим сигналом границы раздела таких сред и его фазы.

Отражение непрерывных и импульсных акустических сигналов изучено теоретически и экспериментально достаточно подробно [1,2], при этом для частного случая нормального отражения поперечной волны (ПВ) от границы твердого тела с жидкостью всегда считалось, что отражение является полным в силу невозможности распространения ПВ в жидкости. Нами в работах [4 – 6] изучалось теоретически отражение непрерывных и импульсных продольных акустических сигналов от границы твердого тела с сильно диссипативной средой (СДС), результаты которого подтвердились экспериментально [6] при акустических исследованиях слоистой структуры оргстекло – эпоксидная смола (ЭС) при отверждении последней. Поразительным эффектом были значительные изменения коэффициента отражения (в 8.5 раз) при отверждении компаунда, приготовленного в объемном соотношении 4:1 ЭС и отвердителя. Представляет несомненный интерес развитие проведенных исследований и их обобщение на распространение поперечных волн в таких слоистых структурах. Отметим, что в жидкости распространение ПВ невозможно [2, 3]. Тем не менее, следует ожидать влияния состояния отражающей СДС на спектральные характеристики отраженных сигналов. В реальной жидкости помимо объемной вязкости всегда имеет место сдвиговая вязкость, которая обеспечивает проникновение ПВ в жидкость, быстро затухающих в ней, а при малых жидкостных зазорах между твердыми телами обуславливает и прохождение таких колебаний. Таким образом, при отраже-

нии ПВ от плоской границы раздела твердого тела с реальной достаточно вязкой жидкостью возможно возникновение некоторых особенностей для коэффициента отражения акустического сигнала, ранее не рассматривавшие и составившие цель данной работы.

Пусть в твердом теле без затухания распространяется непрерывная плоская гармоническая ПВ, которая при нормальном падении на границу с вязкой жидкостью частично отражается, а прошедшая ПВ в жидкости очень быстро затухает. Волновые уравнения для ПВ в твердом теле (1) и диссипативной среде (2) имеют следующий вид [1]:

$$\rho_1 u_{1y} = \mu_1 u_{1y,xx} \tag{1}$$

$$\rho_2 u_{2y} = \eta_2 u_{2y,txt} \tag{2}$$

где u_y – компонента поперечного смещения в ПВ, μ_1 – второй коэффициент Ламэ, ρ – плотность, η_2 – сдвиговая вязкость, $u_{1y,xx} = \partial^2 u_{1y} / \partial x^2$, $u_{2y,txt} = \partial^3 u_{2y} / \partial x^2 \partial t$.

Решения для падающей (I), отраженной (R) и прошедшей (T) ПВ ищем в виде [2]:

$$\begin{aligned} u_1^I &= u_{01}^I \exp[i(k_1 x - \omega t)] \\ u_1^R &= u_{01}^R \exp[i(-k_1 x - \omega t)] \\ u_2^T &= u_{02}^T \exp[i(k_2 x - \omega t)] \end{aligned} \tag{3}$$

где $k_1 = \omega / S_{1b}$, $k_2^2 = i\rho_2 \omega / \eta_2$ – волновые числа, S_{1b} – скорость ПВ, ω – частота, t – время.

Граничные условия при $x=0$ представляют собой непрерывность упругих смещений и напряжений на границе сред и имеют вид:

Костюк Дмитрий Александрович. Аспирант каф. ЭВМиС Брестского государственного технического университета. БГТУ, Беларусь, г. Брест, ул. Московская 267.

Кузавко Юрий Алексеевич. К. ф.-м.н., член-кор. МАИ, коммерческий директор ООО НПК "СЭТ".

$$u_{1y}^I + u_{1y}^R = u_{1y}^T, \tag{4}$$

$$\mu_1(u_{1y,x}^I + u_{1y,x}^R) = \eta_2 u_{1y,xt}^T.$$

Решения (3) удовлетворяют соответствующим волновым уравнениям, а будучи представленными в (4), дают систему линейных уравнений для определения коэффициентов отражения $R = u_{01}^R/u_{01}^I$ и прохождения $T = u_{01}^T/u_{01}^I$ ($T = I + R$). Коэффициент отражения R_ω и его фаза Ψ_ω^R имеют следующий вид:

$$R_\omega = \frac{z_1^2 - z_2^2 + i2z_1z_2}{z_1^2 + 2z_1z_2 + 2z_2^2}, \quad \text{tg } \Psi_\omega^R = \frac{2z_1z_2}{z_1^2 - z_2^2}, \tag{5}$$

где $z_1 = \rho_1 S_{II}$ – акустический импеданс твердого тела, $z_2 = (\eta_2 \rho_2 \omega / 2)^{1/2}$ – параметр, по размерности совпадающий с импедансом и характеризующий акустические свойства диссипативной среды при распространении в ней ПВ.

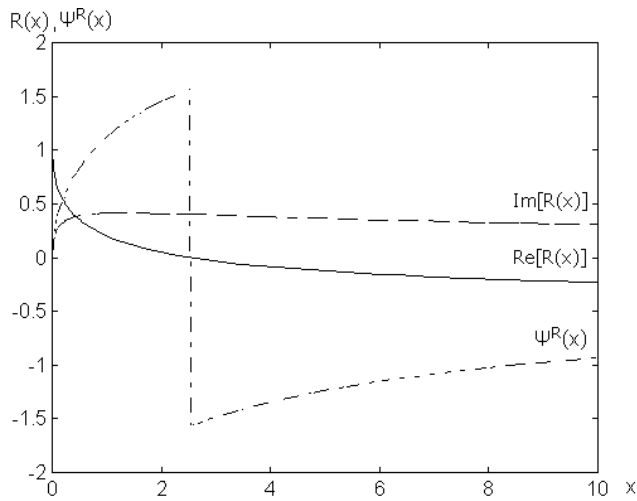


Рисунок 1. Коэффициент отражения R_ω и фаза Ψ_ω^R непрерывной ПВ от границы раздела оргстекло-ЭС. $\omega_c = 2\pi \cdot 10^6$ МГц

Таким образом, согласно (5) при отражении ПВ от диссипативной среды меняется ее амплитуда и фаза (см. рисунок 1). При $\omega \rightarrow 0$ $R_\omega \rightarrow 1$, $\Psi_\omega^R \rightarrow 0$, а при $\omega \rightarrow \infty$ $R_\omega \rightarrow 1/2$, $\Psi_\omega^R \rightarrow \pi/2$. Введем некоторую эффективную частоту $\omega_c = z_1^2 / \eta_2 \rho_2$ и $x = \omega / \omega_c$. Рассмотренное поведение R_ω и Ψ_ω^R аналогично поведению физической системы при ее резонансе, т.е. вблизи частоты ω_c возникает резонансное поглощение ультразвуковой энергии ПВ, которое фазовыми измерениями, более точными чем амплитудными, может быть зафиксировано. Возвращаясь к выражению для эффективной частоты ω_c , легко видно, что таким способом можно измерять сдвиговую вязкость жидкостей.

Для полноты рассмотрения приведем также коэффициент прохождения T_ω и фазу Ψ_ω^T прошедшей ПВ:

$$T_\omega = 2 \frac{z_1^2 + z_1z_2 + iz_1z_2}{(z_1 + z_2)^2}, \quad \text{tg } \Psi_\omega^T = \frac{z_2}{z_1 + z_2}, \tag{6}$$

графические зависимости, которых представлены на рисунке 2.

Реальный акустический импульсный сигнал можно представить следующим соотношением:

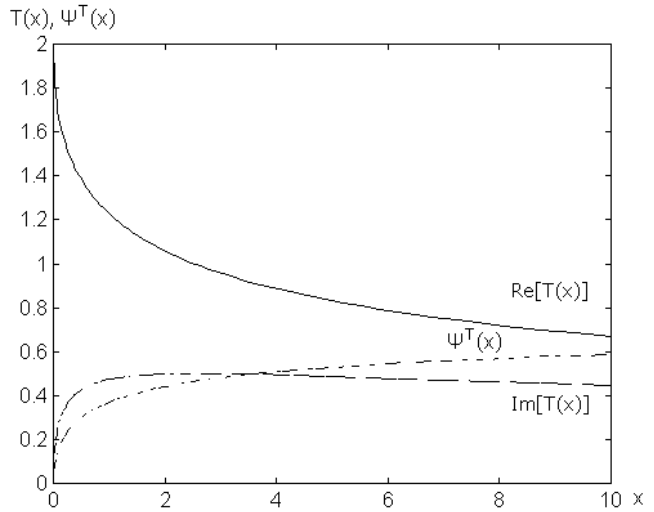


Рисунок 2. Коэффициент прохождения T_ω и фаза Ψ_ω^T непрерывной ПВ от границы раздела оргстекло-ЭС

$$u_1^I(x=0, t) = u_1^I e^{-\alpha \frac{|t-\tau|}{T}} \sin 2\pi \frac{t}{T} \left[\theta(t + \frac{\tau}{2}) - \theta(t - \frac{\tau}{2}) \right], \tag{7}$$

где α – безразмерный параметр, определяющий огибающую излучаемого акустического импульса; $T = 2\pi/\omega_0$ – период импульса, $\tau = nT$ – его длительность, n – некоторое целое число, равное количеству периодов излучаемого импульса. Исходя из приведенной зависимости R_ω (5) для реального сигнала (7) и используя прямое и обратное преобразования Фурье

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} u_1^I(x=0, t) e^{iat} dt \tag{8}$$

$$u_1^R(x=0, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) R_\omega e^{-iat} d\omega \tag{9}$$

с помощью компьютера рассчитывалась форма отраженного сигнала от границы раздела оргстекло-ЭС со следующими материальными и числовыми константами: $z_1 = 3.1 \cdot 10^6$ кг/(м²с), $\eta_2 = 10^2$ кг/(м²с), $\rho_2 = 1.21 \cdot 10^3$ кг/м³ и $n = 6$, $\alpha = 1.6$. Результаты расчета представлены на рисунке 3. Откуда видна существенная зависимость амплитуды и фазы отраженного сигнала от частоты ω_0 основной гармоники импульсного сигнала. Фазу отраженного импульса понимаем несколько более обобщенно, чем это имеет место для непрерывных колебаний, а именно как значение смещения пересечения с осью t излученного и отраженного импульсов. Преобразование (8), примененное к излученному импульсу $u_1^I(x, t)$ и отраженному $u_1^R(x, t)$, дает их спектры, которые между собой отличны (рисунок 5). На рисунке 4 представлены выполненные согласно (6)-(9) расчеты формы прошедшего границу сигнала в зависимости от частоты ω_0 основной гармоники импульсного сигнала. На рисунке 5 представлен спектр прошедшего сигнала, опять отличный как от излученного, так и отраженного сигналов.

Заметим, что примененные программные средства позволяют выяснить особенности отражения, а также прохождения для любой формы излучаемых импульсов ПВ. Аналитические расчеты возможны частично для простейших форм излучаемых сигналов (например, для прямоугольного или нескольких периодов синусоидального, практически нереализуемых), но

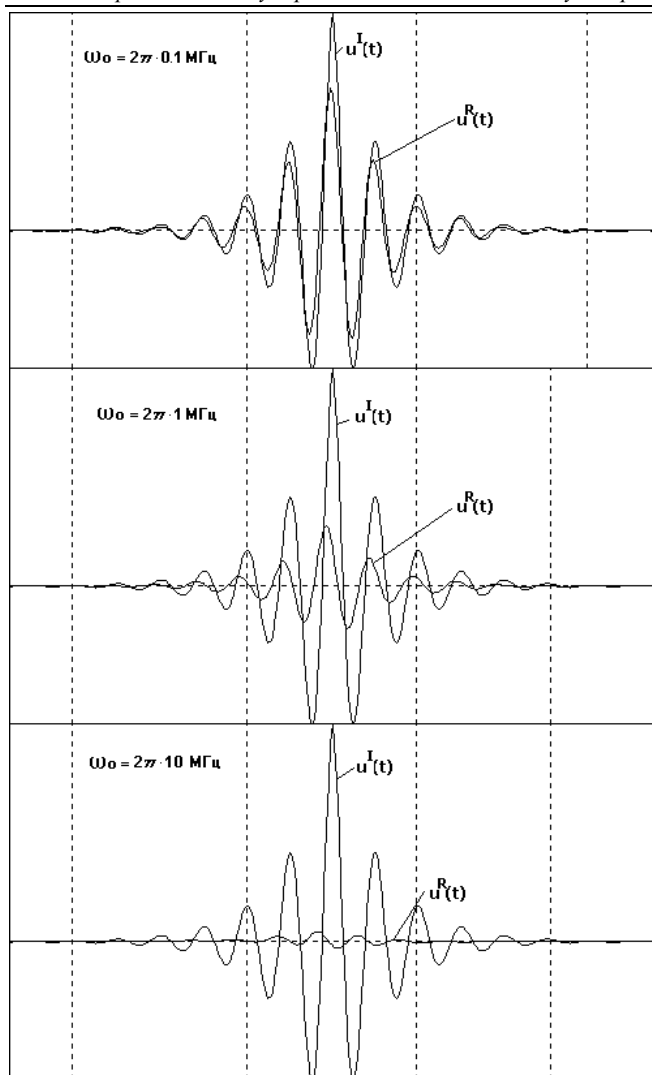


Рисунок 3. Расчетные изменения формы отраженного от границы раздела оргстекло-ЭС акустического импульса в зависимости от частоты ω_0 основной гармоники

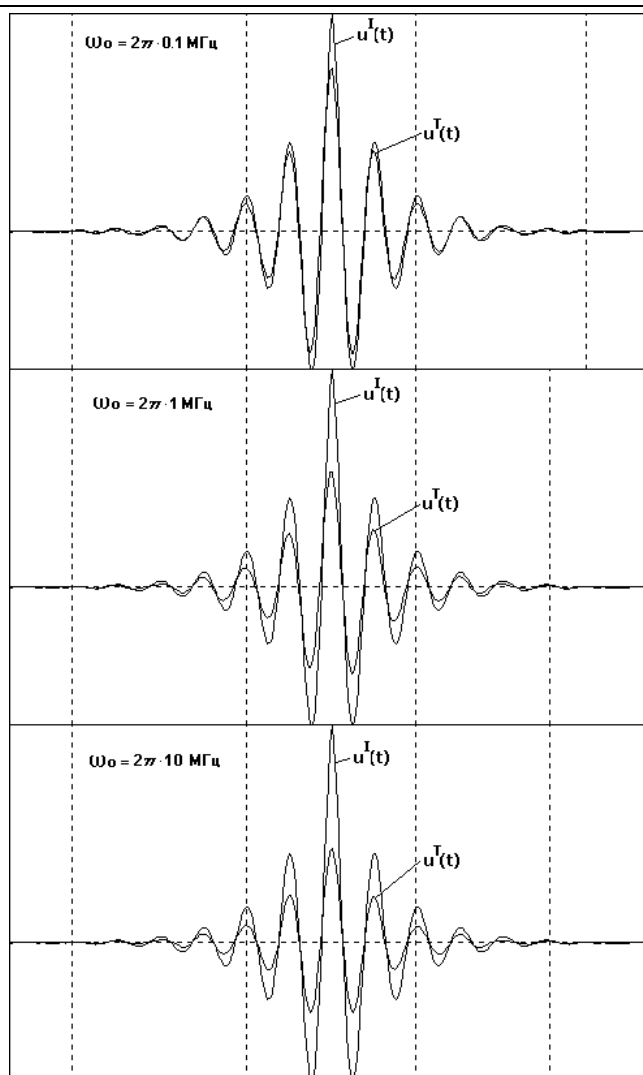


Рисунок 4. Расчетные изменения формы прошедшего границу раздела оргстекло-ЭС акустического импульса в зависимости от частоты ω_0 основной гармоники

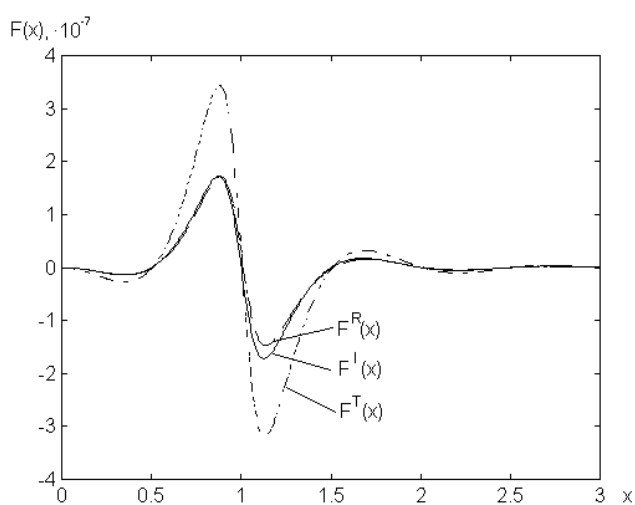


Рисунок 5. Спектры излученного $F^I(x)$, отраженного $F^R(x)$ и прошедшего $F^T(x)$ акустического импульса для слоистой структуры оргстекло-ЭС

нетривиальный частотнозависимый вид R_ω и T_ω затрудняет или делает невозможным нахождение спектра и формы отраженных и прошедших сигналов.

Следует сделать вывод, что состояние отражающей СДС значительно влияет на коэффициент отражения (изменение его на 50%) и фазу как непрерывных, так и импульсных акустических поперечных волн. Точное измерение эффективной частоты ω_c по фазовым соотношениям падающего и отраженного сигналов позволяет рассчитать сдвиговую вязкость СДС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. / М.: Наука. 1990. 432с.
2. Дьелсан Э., Руайе Э. Упругие волны в твердых телах / М.: Наука. 1982. 424с.
3. Костюк Д.А., Кузавко Ю.А. Акустические импульсные исследования при моделировании пар трения. / Материалы международной научно-технической конференции «Современные направления развития производственных технологий и робототехника». Могилев, 1999.
4. Акулич Я.А., Костюк Д.А., Кузавко Ю.А. Акустические исследования пар трения. / Тезисы докладов международ-

- ного симпозиума о природе трения твердых тел. Гомель, 1999.
5. Костюк Д.А., Кузавко Ю.А. Ультразвуковая диагностика процессов отверждения веществ. / Материалы 2-й международной научно-технической конференции «Ультразвуковая техника и технология». Минск, 1999.

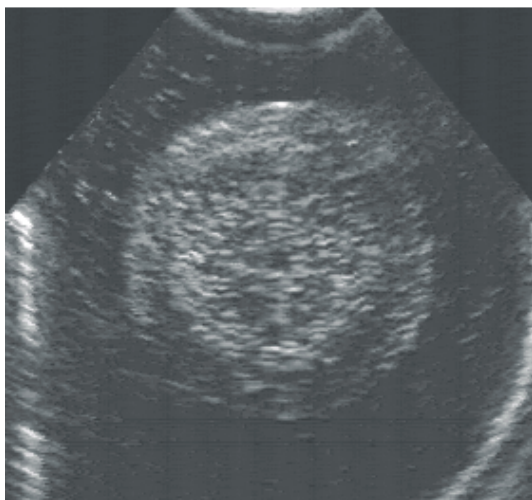
6. Kostiuk D.A., Kuzavko Yu.A. Anomalies of reflection of acoustic pulses from boundary with strong dissipative medium. / Proceedings of international conference on neural networks and artificial intelligence. Brest, 1999.

УДК 621.891

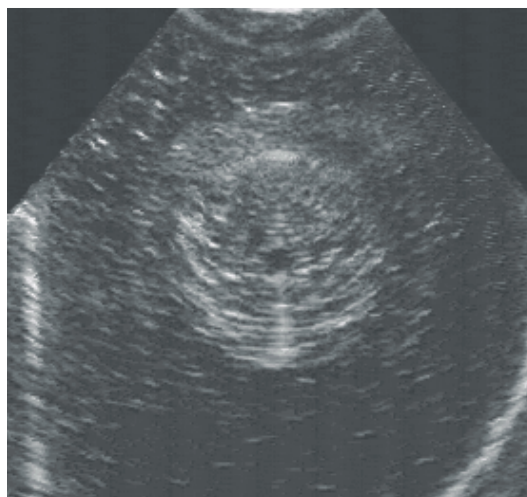
Акулич Я.А., Костюк Д.А., Кузавко Ю.А.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЭХОТОГРАММ ОБЪЕКТОВ ТРЕНИЯ ТИПА "ВАЛ-ВТУЛКА"

Ранее был представлен способ получения двумерных акустических эхотограмм объектов трения, при помощи разработанного нами ультразвукового диагностического комплекса [1]. В состав ультразвукового диагностического комплекса входят следующие компоненты: эхотомоскоп снабженный ультразвуковыми пьезокерамическими преобразователями с механическим и электронным сканированием, имеющий встроенные блоки просмотра, управления и предварительной обработки информации, видеоадаптер, сопрягающий выходной сигнал эхотомоскопа с входом персонального компьютера, персональный компьютер с принтером, а также оптический сканер. На первом этапе, ультразвуковой диагностический комплекс позволяет получать акустические изображения на экране монитора собственно эхотомоскопа и проводить ограниченное число операций по обработке этих изображений. Затем, с помощью специально разработанного видеоадаптера и программного обеспечения к нему, полученное акустическое изображение в реальном масштабе времени передается на ПК, где и осуществляется дальнейшая обработка этих изображений. При этом реализуются возможности, как непосредственной обработки изображений при проведении ультразвукового сканирования объектов трения в режиме реального времени, так и сохранения изображений для дальнейшей работы с ними, с использованием универсальных и специальных программных средств. Использование высокопроизводительных ПК позволяет на качественно новом уровне анализировать и обрабатывать полученные эхотограммы.



а)



б)

Рисунок 1. Акустические изображения пары трения "вал-втулка" не подвергавшиеся обработке: а) Частота вращения 400 мин⁻¹, без нагрузки; б) Частота вращения 400 мин⁻¹, нагрузка 1000 Н

Экспериментальные акустические изображения были получены с использованием машины для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1. В испытательную камеру данной машины была помещена пара трения типа "вал - втулка". Материалом вала служила сталь 40Х, втулка была изготовлена из бронзы ОЦС-5-5-5. Данные материалы нашли широкое применение в уплотнительных устройствах, подшипниках скольжения и других узлах трения. В качестве рабочей жидкости использовалось масло индустриальное И-40А. В испытательной камере машины трения при помощи специального крепления был закреплен УЗП с механическим сканированием.

На рисунке 1 представлены полученные при помощи ультразвукового сканирования акустические изображения пары трения типа "вал-втулка".

Ультразвуковая визуализация процессов трения сопряжена с определенными трудностями, вызванными возникновением ложных изображений, возникающих в результате переотражений и трансформаций ультразвуковых колебаний при сканировании. Для борьбы с подобными искажениями нами предлагается использовать цифровую обработку акустических изображений.

Обработка изображений осуществлялась как с помощью

Акулич Ярослав Антонович. Старший преподаватель каф. "Машиноведения" Брестского государственного технического университета.

Костюк Дмитрий Александрович. Аспирант каф. ЭВМиС Брестского государственного технического университета. БГТУ, Беларусь, г. Брест, ул. Московская 267.

Кузавко Юрий Алексеевич. К. ф.-м.н., член-кор. МАИ, коммерческий директор ООО НПК "СЭТ".