

ВОЛНОВОДНЫЕ АКУСТОИМПЕДАНСНЫЕ УРОВНЕМЕРЫ И СИГНАЛИЗАТОРЫ ЖИДКОСТИ

В.И. Мельников

Рассмотрены физические закономерности, лежащие в основе волноводных акустоимпедансных уровнемеров и сигнализаторов жидкости. Описаны конструктивные особенности волноводных чувствительных элементов на основе продольных, изгибных и крутильных нормальных волн. Приведены основные технические, конструктивные и рабочие характеристики акустоимпедансного уровнемера с волноводом продольных волн и многоточечных сигнализаторов уровня жидкости с одиночным чувствительным элементом.

Ключевые слова: уровнемер, сигнализатор уровня жидкости, акустический волновод, пьезопреобразователь.

Акустоимпедансный метод определения уровня жидкости основан на свойстве изменения параметров акустических волн, распространяющихся по протяженному волноводу, при погружении его в жидкость. Эти изменения проявляются в виде дополнительного затухания ультразвука, вследствие излучения части акустической энергии поверхностью волновода в жидкость, а также дисперсии акустических импульсов из-за эффекта влияния присоединенной массы жидкости [1].

Часть волновода, находящаяся в контакте с окружающей жидкостью, образует чувствительный элемент или пробник. Акустический преобразователь соединяется с чувствительным элементом при помощи волновода связи [2,3,4]. Для обеспечения устойчивости датчика в среде с экстремальными параметрами (высокие температура, давление, химическая и радиационная активность) применяют металлические волноводы, изготавливаемые, как правило, из коррозионно-устойчивых сортов стали, например, типа 12Х18Н10Т.

При практическом осуществлении акустоимпедансных датчиков используют продольные, изгибные и крутильные нормальные волны нулевого порядка. Для генерации требуемого вида волн применяют пьезопреобразователи соответствующего исполнения, конструкции которых промышленные компании не раскрывают.

Рассмотрим основные физические закономерности, описывающие распространение нормальных волн по волноводу, погруженному в жидкость.

Уменьшение амплитуды акустической волны, вследствие уноса части энергии в жидкость, определяется формулой:

$$A = A_0 \exp(-\delta l), \quad (1)$$

где δ – постоянная затухания;

l – длина чувствительного элемента.

Влияние присоединенной массы жидкости приводит к уменьшению скорости распространения акустической волны в волноводе:

$$c = c_0 - \Delta c, \quad (2)$$

где c_0 – скорость звука в несмоченном жидкостью волноводе;

Δc – поправка к скорости распространения звука.

Кроме того, возникает дисперсия акустических импульсов, приводящая к расплыванию сигналов во времени.

Численные значения постоянной затухания δ и поправки к скорости Δc весьма существенно зависят от типа используемых волн.

Постоянная затухания продольной волны нулевого порядка в цилиндрическом волноводе определяется соотношением:

$$\delta = \frac{a\omega^2\nu^2}{E c_{ст}} \rho_{ж} c_{ж}, \quad (3)$$

где a – радиус волновода;

ω – круговая частота акустической волны;

ν – модуль Пуассона материала волновода;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости;

$c_{ж}$ – скорость звука в жидкости;

E – модуль Юнга материала волновода;

$c_{ст}$ – стержневая скорость продольных волн в волноводе.

Произведение $\rho_{ж} c_{ж}$ называют акустическим волновым сопротивлением среды.

Следует отметить, что численно постоянная затухания продольной волны δ при практически используемых размерах волновода и частотах ультразвука не велика и составляет величину порядка 1,0 1/м (рис.1). Это позволяет применять длинные волноводные чувствительные элементы примерно до 1м. При необходимости использовать короткие чувствительные элементы повысить величину постоянной затухания (т.е. чувствительность) можно применяя вместо стержней тонкостенные трубки – капилляры. При этом величина δ , по сравнению со стержневым чувствительным элементом, увеличивается в S_c/S_k число раз (рис.1). Здесь S_c – сечение стержня, S_k – сечение материала капилляра.

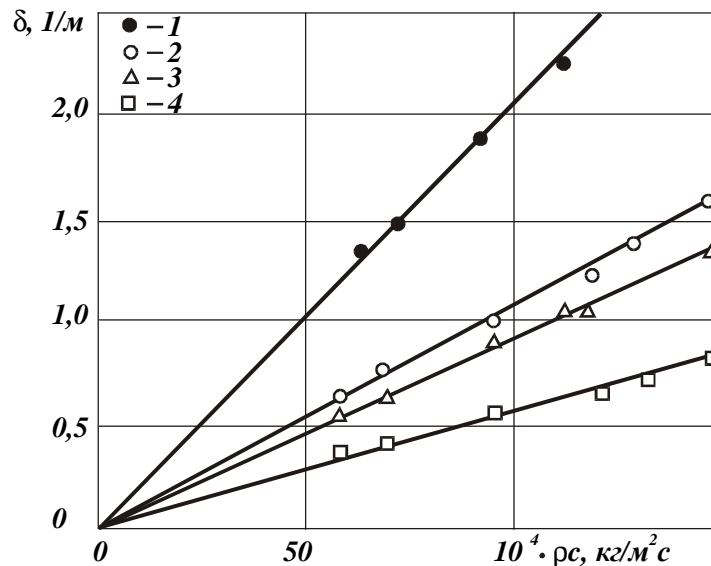


Рис. 1. Зависимость постоянной затухания продольных волн в волноводе от акустического волнового сопротивления окружающей ее жидкости $\rho_{ж} c_{ж}$ на частоте 800кГц:

1 – капилляр $\varnothing 1.0 \times 0.15$ мм; стержень: 2 – $\varnothing 1.0$ мм; 3 – $\varnothing 0.8$ мм; 4 – $\varnothing 0.5$ мм.

Отметим, что поправка к скорости распространения продольной волны практически равна нулю. Поэтому дисперсия акустических импульсов, обусловленная влиянием жидкости, минимальна.

Реакция изгибной волны, распространяющейся в волноводе, на омывающую его среду, носит более сложный характер и зависит от соотношения скорости звука в среде $c_{ж}$ и скорости изгибной волны в волноводе $c_{изг}$. При $c_{изг} < c_{ж}$ влияние среды носит инерционный характер, затухание волны отсутствует, а скорость ее распространения уменьшается. На низких частотах в

цилиндрическом волноводе поправка к скорости распространения имеет вид:

$$\Delta c = \frac{\rho_{жс}}{4\rho} \sqrt{2ac_{ст}\omega}, \quad (4)$$

где ρ - плотность материала волновода.

При этом амплитуда волны не уменьшается, зато наблюдается значительная дисперсия акустических импульсов, которая увеличивается при уменьшении длительности импульсов и увеличении длины волновода.

На высоких частотах $c_{изг} > c_{жс}$ присутствие омывающей волновод среды приводит к уменьшению амплитуды изгибной волны вследствие уноса части энергии. В этом случае постоянная затухания в цилиндрическом волноводе определяется формулой:

$$\delta = \frac{1}{2\rho a \sqrt{2\omega a c_{ст}}} \rho_{жс} c_{жс} \quad (5)$$

При этом поправка к скорости распространения - Δc незначительна и в большинстве случаев ею можно пренебречь.

С учетом того, что с уменьшением частоты колебаний скорость изгибной волны снижается практически до нуля, разработчик может выбирать режим работы будущего прибора, задавая необходимую частоту акустических колебаний и выбирая диаметр волновода.

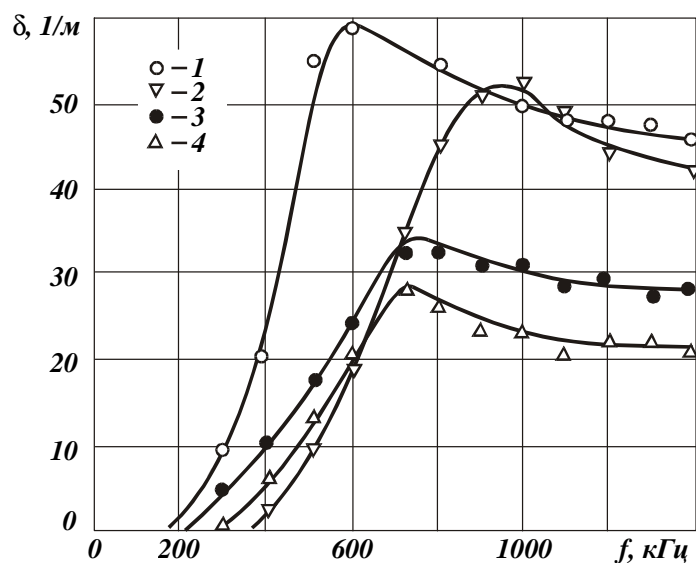


Рис. 2. Зависимость постоянной затухания изгибной волны нулевого порядка в цилиндрическом волноводе, погруженном в жидкость: 1 – хлороформ; 2 – вода; 3 – ацетон; 4 – гексан.

На рисунке 2 показана экспериментально полученная зависимость постоянной затухания нормальной изгибной волны нулевого порядка в цилиндрическом волноводе диаметром 0,8мм, погруженном в жидкость.

Отметим, что постоянная затухания изгибных волн более чем в 10раз больше, чем продольных, соответственно значительно уменьшается рабочая длина чувствительных элементов.

Поведение нормальных крутильных волн нулевого порядка отличается следующими особенностями. Во-первых, это нулевая дисперсия при распространении волн, что позволяет передавать акустические импульсы без искажений в широком диапазоне частот. Во-вторых, цилиндрический волновод крутильных волн не излучает акустическую энергию в окружающую среду, поэтому затухание волн в нем обуславливает только вязкость жидкости.

Для того чтобы в акустические колебания в чувствительном элементе крутильных волн затухали, необходимо использовать волноводы, например, прямоугольного сечения. При крутильном движении края (ребра) волновода совершают изгибные колебания, свойства которых описываются соотношениями (4, 5).

В общем случае при разработке конструкций волноводных датчиков необходимо учитывать дисперсионные свойства самих волноводов, поскольку наличие дисперсии приводит к затягиванию импульсных сигналов, дополнительной их интерференции и другим проблемам.

Так при использовании волноводов продольных волн диаметр волновода и частоту акустического сигнала следует выбирать из условия:

$$\frac{a\omega}{c_{ст}} \leq 0,3 \quad (6)$$

Поэтому при частоте ультразвука порядка 600кГц используют стальные волноводы диаметром не более 1мм.

Если в приборе применяются волноводы изгибных волн, работающие по принципу определения затухания акустического сигнала, то на тех же частотах следует использовать чувствительные элементы диаметром не менее 2мм.

В разработанном нами уровнемере жидкости СЖУ-1-АИ используется волновод продольных волн, как волновод связи, так и в качестве чувстви-

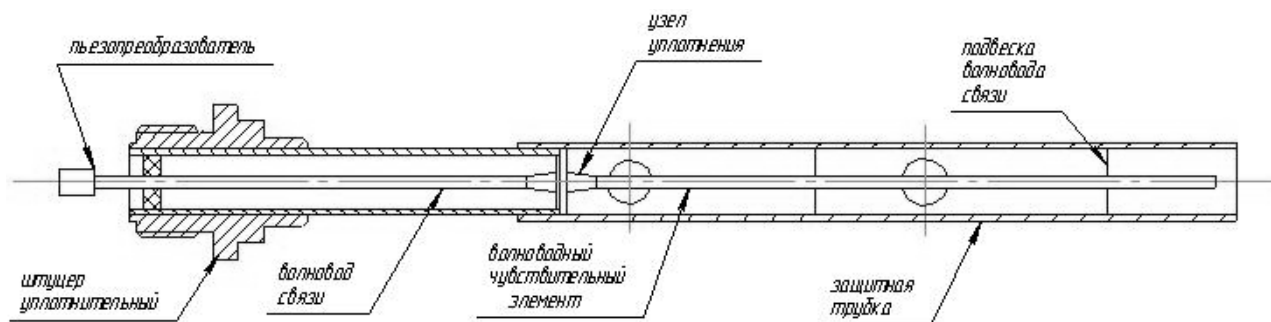


Рис.3. Конструкция акустического тракта акустоимпедансного уровнемера.

тельного элемента. Конструкция акустического тракта прибора приведена на рис. 3. Диаметр волновода 0,8 – 1,0мм, длина волновода связи 200мм, длина чувствительного элемента варьируется от 200мм до 1м.

Для придания необходимой жесткости конструкции чувствительный элемент помещен в защитную трубку диаметром 12х1мм и закреплен элементами подвески, не препятствующими распространению волн в нем. Заполнение внутреннего объема защитной трубки контролируемой жидкостью происходит через отверстия. Электронная схема размещена в корпусе, установленном на фланце, прикрепленном к уплотнительному штуцеру.

Внешний вид уровнемера показан на рис.4.

Работает уровнемер следующим образом. Пьезопреобразователь активируется видеоимпульсами длительностью около 0,7мкс и амплитудой 20В. Акустический импульс, распространяясь по волноводу связи, достигает вначале узла уплотнения, от которого частично отражается и возвращается обратно к преобразователю. Далее прошедшая через узел уплотнения часть энергии импульса распространяется по чувствительному элементу, достигает его кончика, отражается и также возвращается к преобразователю. Принятые преобразователем импульсы имеют амплитуду, соответственно, A_0 и A_1 и разнесены во времени относительно импульса посылки. При погружении чувствительного элемента в контролируемую жидкость амплитуда сигнала A_1 уменьшается по экспоненциальному закону согласно формуле (1).



Рис.4 Акустоимпедансный уровнемер СЖУ-1-АИ

Процессор электронной схемы выполняет функцию линеаризации, выработывая выходной токовый сигнал согласно формуле:

$$I = a_0 + a_1 \ln (A_0/A_1) \quad (7)$$

где a_0 и a_1 – настроечные коэффициенты, определяемые при калибровке таким образом, чтобы при отсутствии жидкости выходной сигнал был равен 4мА, а при полном погружении – 20мА.

Отметим, что амплитуда первого отраженного импульса A_0 не зависит от наличия жидкости на чувствительном элементе. Вместе с тем, из-за температурных факторов, старения, изменения свойств пьезокерамики амплитуда излученного и принятых сигналов (A_0 и A_1) могут несколько меняться. Использование в вычислительной процедуре отношения (A_0/A_1) позволяет скомпенсировать эти не контролируемые изменения. Рабочая частота ультразвука около 700кГц, частота зондирования – 500Гц.

В процессе отработки конструкции прибора проводилась его калибровка в жидкостях с различным акустическим волновым сопротивлением (модельных жидкостях). Результаты представлены на рис.5.

Использование модельных жидкостей позволяет проводить калибровку

приборов, предназначенных для использования в экстремальных условиях высоких температур и давлений. Например, волновое сопротивление воды с ростом параметров уменьшается. Для калибровки уровнемера при нормаль-

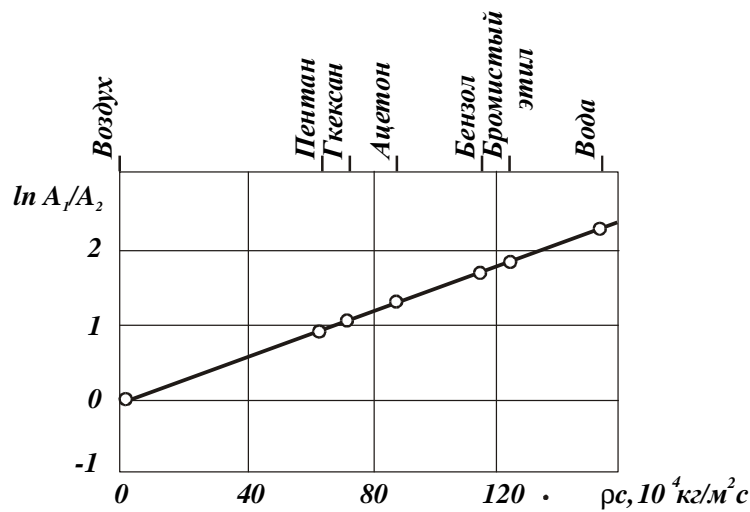


Рис.5. Выходной сигнал в зависимости от волнового сопротивления жидкости.

ных условиях можно использовать подходящие органические жидкости, которые имеют акустические свойства воды при соответствующем высоком давлении и температуре (рис.6).

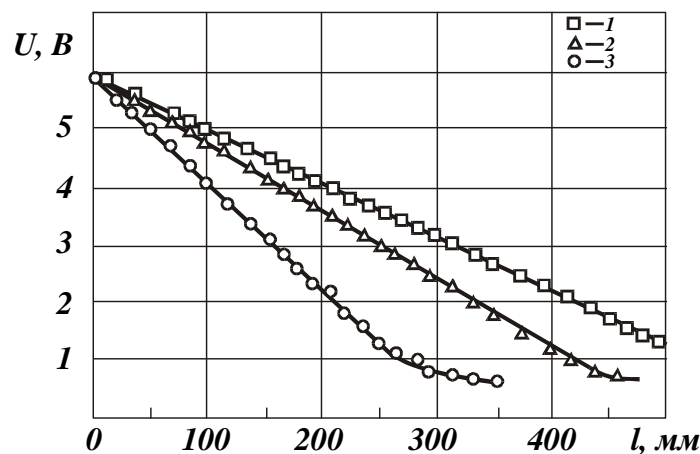


Рис.6. Калибровочная характеристика уровнемера в различных жидкостях. 1 – гексан; 2 – ацетон; 3 – вода.

Многоточечные сигнализаторы уровня СЖУ-1-2 и СЖУ-1-М предназначены для индикации наличия жидкости на заранее заданных значениях уровня. СЖУ-1-2 фиксирует два значения уровня, СЖУ-1-М – от двух до

восьми. Особенностью этих приборов является использование единственного волноводного чувствительного элемента для индикации нескольких значений уровня.

Для решения задачи индикации наличия жидкости на нескольких уровнях в заданных точках на поверхности чувствительного элемента размещаются отражатели ультразвука в виде искусственных «дефектов», выполненных в виде насечек на поверхности волновода (рис.7). При осушенном контролируемом объеме акустические импульсы отражаются вначале от верхнего «дефекта», затем последовательно от расположенного за ним ниже и т.д. и,

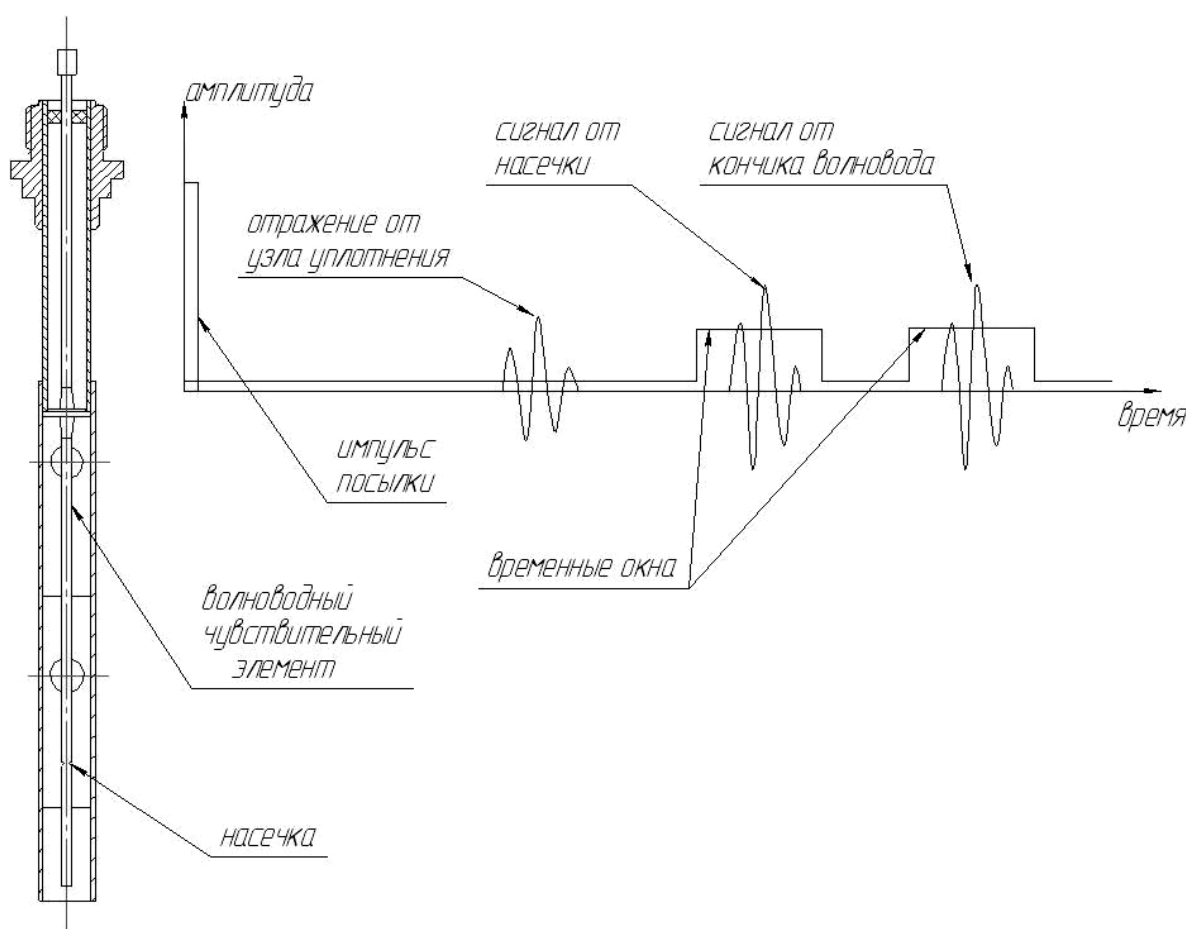


Рис.7. Схема работы двухточечного сигнализатора уровня жидкости

наконец, от кончика волновода. В этой же последовательности импульсы принимаются. Детектирование импульсов осуществляется при помощи компаратора, активируемого задержанными строб-импульсами.

Постепенное погружение чувствительного элемента в жидкость приводит к поглощению энергии импульсов, распространяющихся в волноводе под уровнем жидкости, и уменьшению амплитуды сигналов отражения вначале

от кончика чувствительного элемента, а затем и от «дефектов» погружающихся в жидкость вплоть до их полного исчезновения. Таким образом, увеличение уровня жидкости ведет к тому, что вторичная схема регистрирует вначале исчезновение самого дальнего от импульса посылки принятого сигнала, затем сигнала находящегося перед ним и т.д., отслеживая меняющийся уровень.

В акустическом тракте сигнализатора используется волновод изгибных волн диаметром 2мм. При этом сигнал отражения от «дефекта» ослабляется более, чем в 10 раз при погружении волновода в жидкость менее, чем на 30мм. В практических конструкциях, как правило, расстояние между «дефектами» обычно не менее 60мм.

Основные технические характеристики сигнализаторов СЖУ

Параметры контролируемой жидкости:

температура от -196 до +400 °С;

давление до 6,0 МПа;

вязкость до 10 Пас;

Напряжение питания 24В постоянного тока;

Потребляемый ток - не более 30мА;

Выходные сигналы: токовый выход 4 - 20мА;

Степень защиты корпуса - IP67;

Масса прибора, не более – 1,1 кг;

Длина чувствительного элемента может варьироваться от 120 до 1000мм, помещен в защитную чехловую трубу диаметром не менее 12мм;

Расположение прибора на объекте – вертикальное;

Диапазон температуры окружающего воздуха от - 40 до + 75 °С;

Агрессивность контролируемой среды не должна превышать химическую стойкость стали 12Х18Н10Т;

Схема подключения: 3-х проводная;

Исполнение взрывобезопасное, маркировка – 1ExdibIICT6X;

Местная светодиодная индикация срабатывания на корпусе прибора.

Исполнение

Конструкция совмещенная: датчик и электроника в едином блоке. Погружная часть цельносварная. Электрическая схема сигнализатора размещена во взрывозащищенном герметичном корпусе и содержит перепрограммируемый микропроцессор. Клемная колодка размещена под винтовой крышкой, уплотняемой паронитовой прокладкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников В.И., Дробков В.П., Контелев В.В. Акустические методы диагностики газожидкостных потоков. М.: Энергоатомиздат. 2006. 351с.

2. Мельников В.И. Акустические волноводные сигнализаторы уровня жидкости//Датчики и системы.-2009.-№11.-с.6-10.

3. Мельников В.И. «Ультразвуковой сигнализатор уровня жидкости» Свидетельство на полезную модель №971. 1995г.

4. Мельников В.И. «Ультразвуковой сигнализатор уровня жидкости» Свидетельство на полезную модель №15132. 2002г.

Владимир Иванович Мельников – д-р техн. наук, профессор, кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», НГТУ (Нижний Новгород)

E-mail: melnikov@ntu.nnov.ru, sgu-1@yandex.ru

тел. (831) 436-80-29

факс. (831) 831-223-71-02

сайт: www.ais-nn.ru