

В. В. Гущин, С. Н. Рубцов

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский радиофизический институт», Н. Новгород, ул. Б. Печерская, д. 25/12а, e-mail: [gvvladimir@nirfi.sci-nnov.ru](mailto:gvvladimir@nirfi.sci-nnov.ru)*

## Акустический мониторинг состояния песчаного грунта

*Получена 14.04.2015, опубликована 28.05.2015*

Рассматривается возможность использования импедансного метода для мониторинга состояния песчаных грунтов. Проведено экспериментальное наблюдение изменения характеристик песчаного грунта под внешними воздействиями. Предложена схема организации мониторинга.

Ключевые слова: импедансный метод, плотность среды, установочный резонанс.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно явление снижения прочности слабосвязанных грунтов под воздействием динамических нагрузок разного происхождения [1-4]. По этой причине движущийся транспорт, работа тяжелых машин и механизмов, различного рода взрывы, ветровые и волновые нагрузки могут привести к разрушению и технических сооружений расположенных на этих грунтах. Особенно чувствительны к вибровоздействию песчаные грунты, что делает актуальным проведение постоянного экспресс-мониторинга состояния грунта (изменение его характеристик) в опасных местах, таких как песчаные склоны, насыпи и т.д.

Большинство грунтов согласно [1, 2] увеличивают свой объем под воздействием вибраций. В песчаных грунтах увеличение объема происходит за счет переупаковки и образования пустот между гранулами [5], а в трещиноватых — из-за образования новых трещин и роста существующих. В обоих случаях это приводит к снижению прочности грунта и изменению его акустических характеристик и, в частности, скорости распространения упругих волн в нем.

В основу мониторинга состояния грунта может быть положен контроль изменения фазового набега зондирующего колебания, примененный в работе [6]. Однако, на наш взгляд, этот способ достаточно сложен для организации постоянного и длительного наблюдения. Кроме этого, неоднозначность, возникающая при переходе величины разности фаз значения  $\pm\pi$ , может привести к ошибкам при трактовке результата измерения. Существует более простой способ контроля за изменением механических свойств грунта, который в работе [1] назван методом резонансного фундамента — это

наблюдение за изменением частоты установочного резонанса источника колебаний находящегося на поверхности грунта. Этот метод, более известный в литературе как импедансный, широко используется для поиска неоднородностей в среде и диагностики состояния среды [7-14].

Целью настоящей работы была экспериментальная проверка возможности контроля с помощью импедансного метода изменения механических характеристик песчаных грунтов под внешними динамическими воздействиями и рассмотрение вариантов его реализации в условиях постоянного мониторинга.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИМПЕДАНСНОГО МЕТОДА

Для объяснения проведенных экспериментов достаточно простейшей модели – груз, установленный на упругом основании. Резонансная частота такой системы  $\omega=(k/m)^{1/2}$ , где  $k$  – упругость грунта, а  $m$  – масса, являющаяся суммой массы источника излучения и присоединенной к ней массы колеблющегося грунта. При изменении плотности грунта под воздействием внешних динамических воздействий происходит как изменение его упругих свойств, так и изменение присоединенной массы. Разделение влияния этих эффектов на изменение резонансной частоты затруднено.

Эксперименты проводились в баке высотой 0,7 м, диаметром 0,7 м, заполненном мелким сухим речным песком. Методика проведения измерений полностью подобна описанной в работах по поиску неоднородностей в грунте [13, 14] с той разницей, что измерения проводились при неизменном положении источника излучения, который был установлен на поверхности песка в центре бака. Схема проведения измерений представлена на рис. 1. Источником колебаний являлся датчик скорости СВ-20 (1), работающий в обращенном режиме, на крышке которого был жестко закреплен акселерометр КВ10 (2). Необходимо отметить, что масса акселерометра много меньше массы источника колебаний.

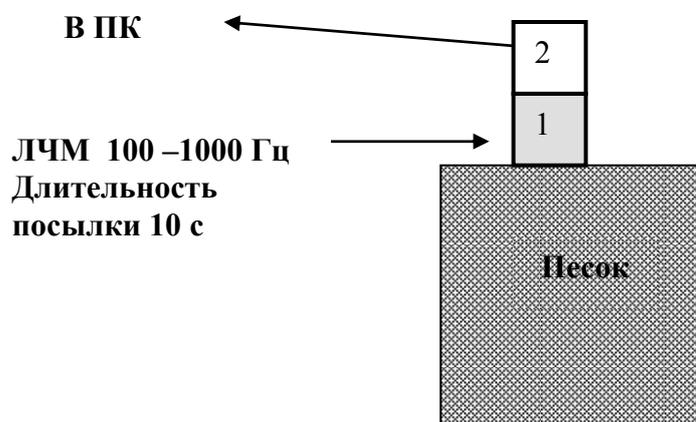


Рис. 1. Схема эксперимента

На вход СВ-20 с сигнал-генератора персонального компьютера (ПК) подавались посылки сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Выходной сигнал акселерометра регистрировался ПК, где определялась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) системы излучатель-песчаный грунт. Типичная АЧХ системы приведена на рис. 2. Температура и атмосферное давление в данном случае не контролировались. На рисунке видно, что АЧХ имеет несколько максимумов, часть из которых вызваны собственными резонансами системы измерений, однако, проведенные эксперименты показали, что информативным является положение основного максимума АЧХ.

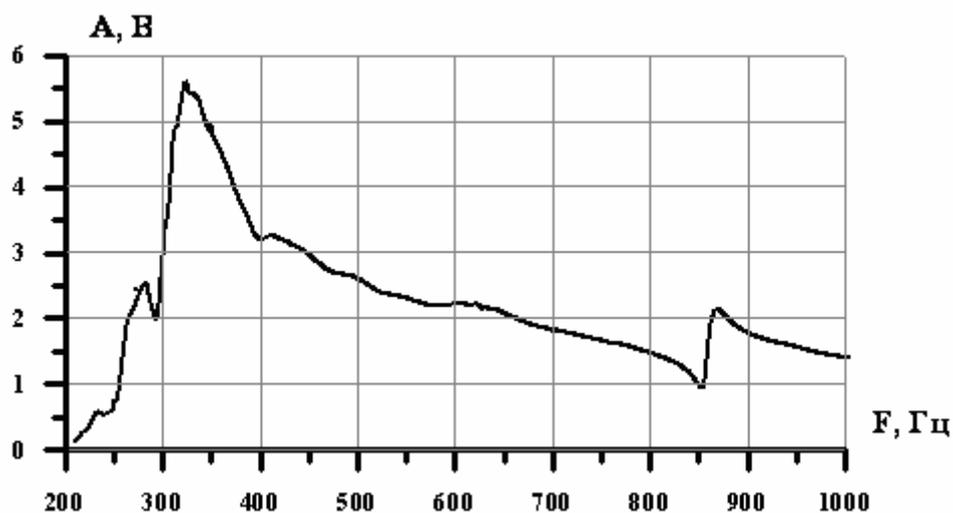


Рис. 2. Типичная АЧХ системы: излучатель СВ-20-песчаный грунт

На первом этапе измерений определялась зависимость частоты установочного резонанса источника колебаний от атмосферного давления и температуры в помещении. Для этого на вход источника СВ-20 подавалось колебание с ЛЧМ ( $\Delta F$  - 100 – 1000 Гц, длительность посылки 10 с.). Результаты измерений представлены на рис. 3. Следует отметить, что на графиках, в отличие от рис. 2, рассматривается АЧХ системы только в районе главного максимума.

С увеличением давления происходит сдвиг максимума резонансной кривой в сторону более высоких частот, что указывает на увеличение упругости подложки.

Сводный результат зависимости частоты установочного резонанса источника от атмосферного давления показан на рис. 4. Измерения проводились в течение 20 дней при неизменном положении источника колебаний. Изменение внешней температуры при этом было в пределах 1 градуса. Наблюдается линейная зависимость частоты установочного резонанса от величины атмосферного давления. Отклонения от линейности (точки 1) связано с внешним неконтролируемым вибрационным воздействием.

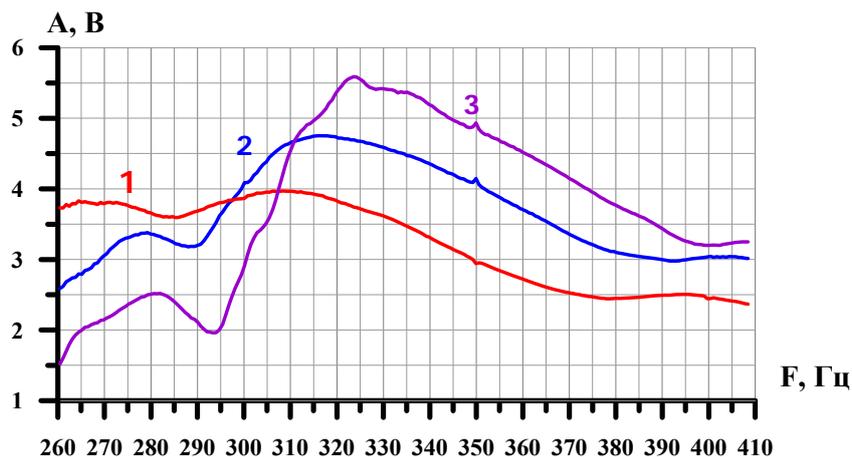


Рис. 3. Изменение частоты установочного резонанса источника СВ-20 в зависимости от атмосферного давления  
 1 –атмосферное давление 729 мм ( $t = 22.8^\circ$ ), 2 – атмосферное давление 738 мм ( $t = 23^\circ$ )  
 3 –атмосферное давление 746 мм ( $t = 21.8^\circ$ )

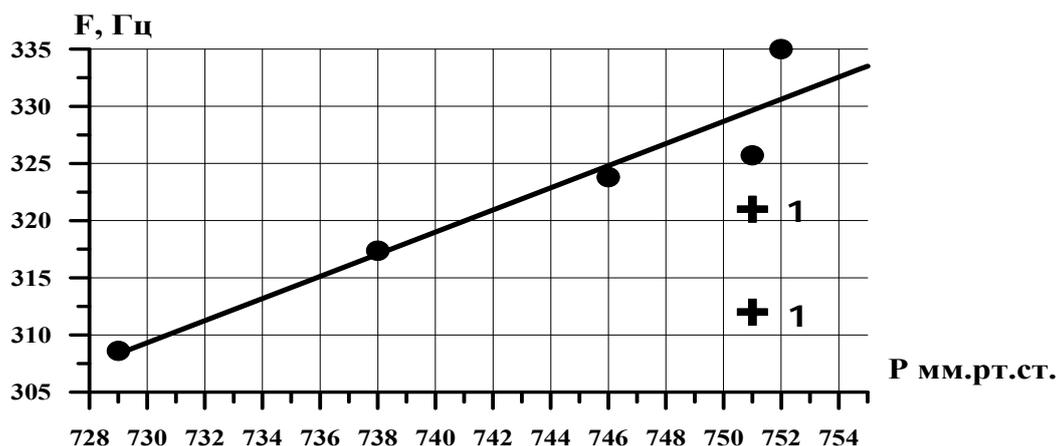


Рис. 4. Изменение частоты установочного резонанса источника СВ-20 в зависимости от атмосферного давления.  
 Точки 1 соответствуют дням, в которых в помещении наблюдалась сильная низкочастотная вибрация, вызванная работой неконтролируемого источника

Изменение частоты установочного резонанса источника СВ-20 от температуры окружающей среды при постоянном давлении показано на рис. 5. С увеличением температуры среды уменьшается ее плотность, что приводит к уменьшению ее упругости.

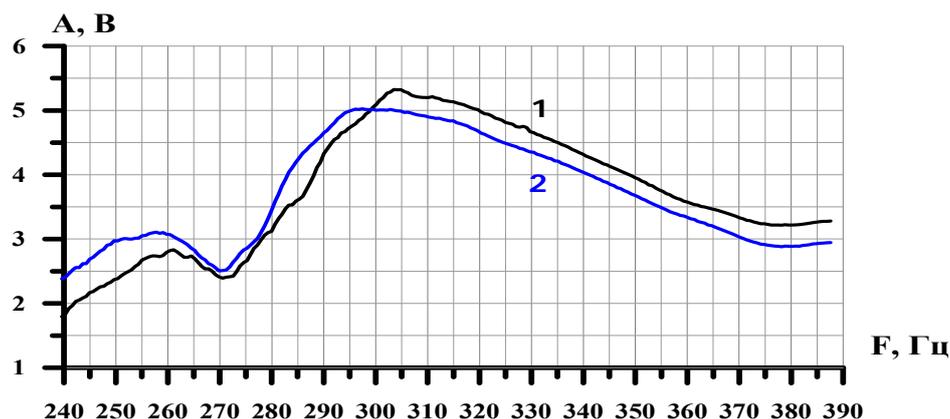


Рис. 5. Изменение частоты установочного резонанса источника СВ-20 в зависимости от внешней температуры

1 –  $t = 22^\circ$ , атмосферное давление 751 мм; 2 –  $t = 24.5^\circ$ , атмосферное давление 751 мм

Ниже приведены результаты измерения частоты установочного резонанса источника под воздействием контролируемых вибраций. На рис. 6 показано изменение частоты установочного резонанса источника после нескольких ударов по стенке бака с песком, а на рис. 7 после того, как в 2-3 м от емкости с песком в течение 10 минут работал вибростенд ВЗД-10. Из рисунков видно, что в обоих случаях внешнее воздействие приводит к уменьшению частоты установочного резонанса системы.

Проведенные эксперименты говорят о применимости предложенного метода для оценки изменения механических характеристик грунта вызванные разными причинами. Недостатком метода является относительно малая глубина контроля.

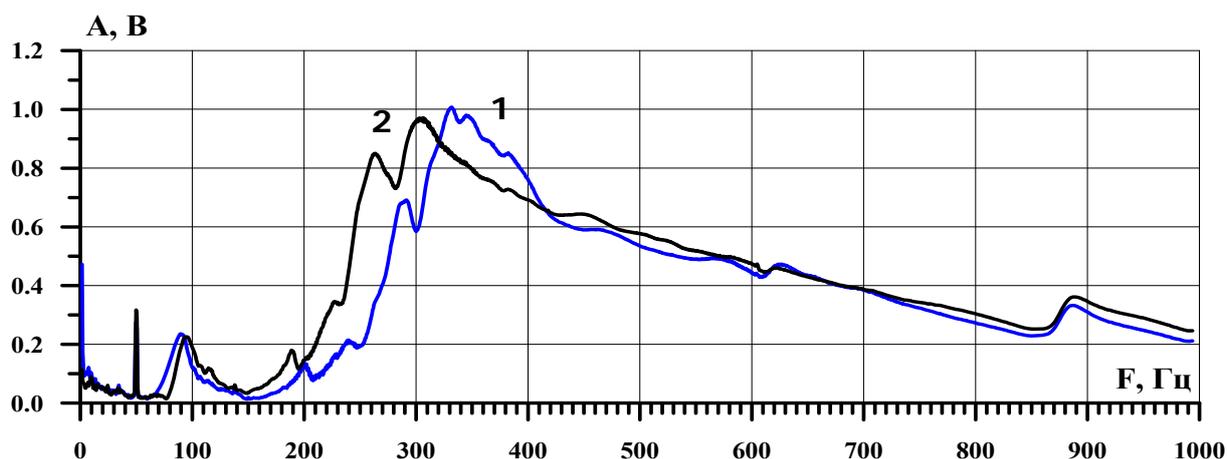


Рис. 6. Смещение частоты установочного резонанса (2) после нескольких слабых ударов по стенке бака

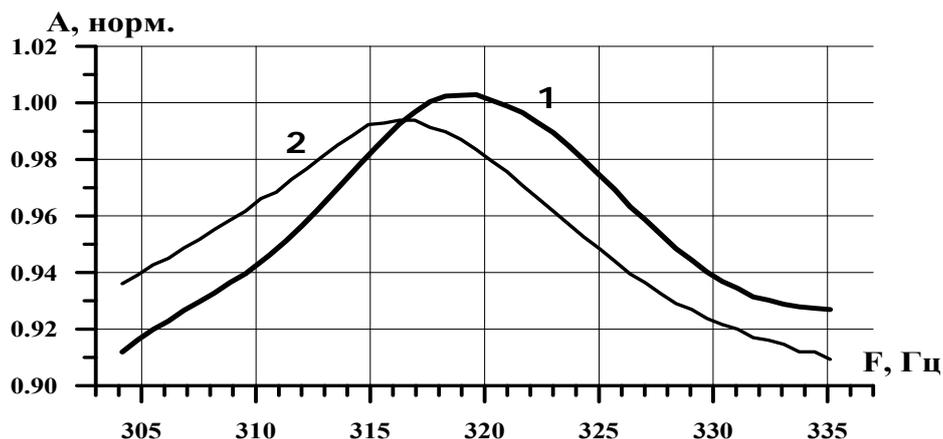


Рис. 7. Смещение частоты установочного резонанса (2) после 10 мин работы вибростенда

## 2. СИСТЕМА С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В наших экспериментах в качестве широкополосного тестового сигнала использовался сигнал с ЛЧМ. Аналогичные результаты даст применение шумового сигнала заданной полосы. Недостатком рассмотренного способа является сложная система обработки сигнала, включающая в себя генератор широкополосного сигнала и устройство спектрального анализа. В то же время достаточно добротные резонансные кривые установочного резонанса позволяют применить для целей мониторинга систему с положительной обратной связью.

В системе с положительной обратной связью, в отличие от рассматриваемого на предыдущем этапе метода, характеристика определяется не по изменению амплитудно-частотной характеристики виброисточника (установочного резонанса системы), а по частоте генерируемой устройством. Частота генерации связана с частотой установочного резонанса системы и также зависит от плотности и упругости грунта под источником. Блок-схема макета представлена на рис. 8.

Система работает следующим образом. Виброизлучатель с закрепленным на нем виброприемником устанавливаются на грунт. Цепь обратной связи, образованная усилителем с регулируемым коэффициентом усиления, полосовым фильтром и фазовращателем, соединяет виброприемник с виброизлучателем. Шумы усилителя и шумы микросейсм грунта через цепь обратной связи «раскачивают» виброизлучатель на частотах, соответствующих подъемам в АЧХ системы источник-приемник-грунт. Необходимыми условиями генерации сигнала в системе (условие положительной обратной связи) являются: набег фаз в системе должен составлять  $2\pi n$ , где  $n$  – целое число, и коэффициент усиления больше 1. Обычно эти условия выполняются для частот соответствующих резонансам амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), вблизи которого обеспечивается необходимый для автогенерации набег фаз. Полосовой фильтр отделяет в АЧХ системы источник-приемник-грунт частотный диапазон возможных установочных резонансов системы, являющихся информационными

параметрами при контроле характеристик грунта, от электромеханических резонансов виброизлучателя. Фазовращатель компенсирует фазовые сдвиги, вносимые полосовым фильтром и переходом виброизлучатель-виброприемник. После компенсации фазовых сдвигов и выбора коэффициента усиления усилителя цепью обратной связи создаются условия генерации на частоте установочного резонанса. Наличие генерации определяется системой распознавания. В ее качестве может быть применены частотомер или динамик. Вывод о характеристиках грунта делается по значению частоты генерации.

Макет предлагаемой системы был собран и опробован на сухом суглинке. Результат работы макета установленного на разрыхленном суглинке приведен на рис. 9.

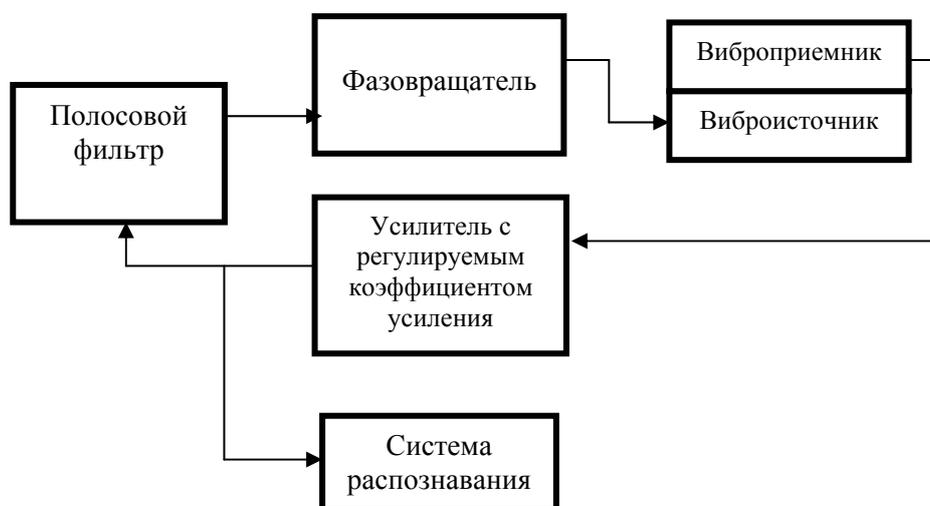


Рис. 8. Блок-схема устройства с положительной обратной связью для мониторинга грунта

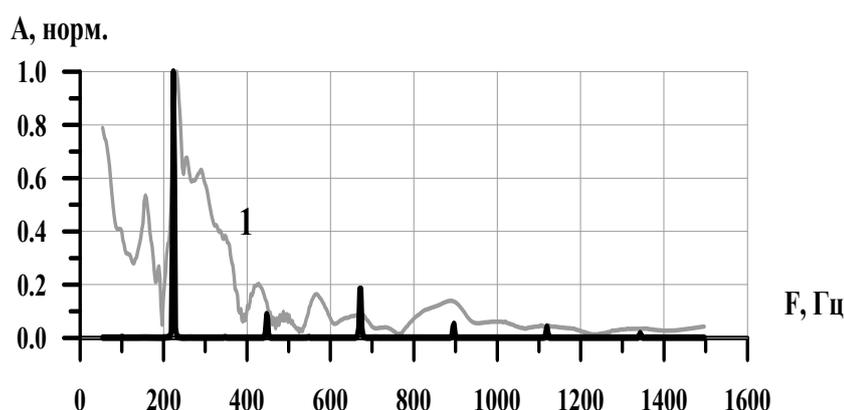


Рис. 9. Частота автогенерации макета, установленного на разрыхленном грунте. Кривая 1 – АЧХ системы при разомкнутой обратной связи

Существенной оказалась установка полосового фильтра, т.к. без него автогенерация происходит не на частоте максимума АЧХ, а на частоте паразитных высокочастотных максимумов АЧХ.

В принципе для работы системы с положительной обратной связью достаточно всегда присутствующих микросейсмов, однако для большей устойчивости ее работы можно организовать маломощную шумовую подсветку.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Импедансный метод является наиболее чувствительным, простым и удобным для оперативной и долговременной регистрации возможных отклонений состояния песчаного грунта от номинальных значений. Эти отклонения могут быть вызваны вибрационным воздействием, приводящим к потере устойчивости грунта и техническим катастрофам. Недостатком метода является малая глубина контроля состояния грунта, из-за чего сужается класс решаемых с его помощью задач. Следует отметить, что импедансный метод контроля применим не только к песчаным грунтам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский Е. А. Динамическая неустойчивость грунтов. М., УРСС Эдиториал. 1999. 263 с.
2. Вознесенский Е. А., Коваленко Е. А., Кушнарева Е. А., Фуникова В. В. Разжижение грунтов при циклических нагрузках. М.: Изд-во МГУ. 2005. 134 с.
3. Иванов П. Л. Разжижение и уплотнение несвязных грунтов при динамических воздействиях. М.: Стройиздат. 1978. 246 с.
4. Зиангиров Р. С., Кутергин В. Н. Факторы, определяющие изменение прочности глинистых грунтов при вибрации // Комплексные инженерно-геологические исследования для промышленного и гражданского строительства. М. 1984. С.23-32.
5. Гольдин С. В., Псахье С. Г., Дмитриев А. И., Юшин В. И. Переупаковка структуры и возникновение подъемной силы при динамическом нагружении сыпучих грунтов. // Физическая мезомеханика. 2001. Т.4. №3. С.97-103.
6. Гуцин В. В., Рубцов С. Н. Особенности модуляции звука звуком в гранулированной среде. // Электронный журнал «Техническая акустика» <http://www.ejta.org>. 2014, 4.
7. Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л. Волновые процессы и резонансы в геофизике. М: ОФИЗ РАН. 2001. С.297.
8. Гуцин В. В., Собисевич Л. Е., Чернов В. В. Устройство поиска повреждений в сплошных средах. Авторское свидетельство №1280521, 1984.
9. Гуцин В. В., Собисевич Л. Е., Чернов В. В. Импедансные методы в задачах обнаружения дефектов покрытий аэродромов, ж/д насыпей, дорог и других инженерных сооружений. // Сборник «Развитие методов и средств экспериментальной геофизики» вып. 1, М. 1993. С. 25-32.
10. Диденкулов И. Н., Лобастов С. А., Чернов В. В. Импедансный метод акустической диагностики. // Труды Научной конференции по радиофизике. Н. Новгород, ННГУ, 2001. С. 250-251.
11. Allan J. Zuckerwar Acoustic ground impedance meter // JASA, 1983, 73 (6), p. 2180-2186.

12. Собисевич А. Л. Мониторинг слоистых неоднородных сред. М.: «Региональная общественная организация учёных по проблемам прикладной геофизики». 2001. С. 353.
13. Батанов А. Ф., Бубнов Е. Я., Гуцин В. В., Миннегулов А. К., Рубцов С. Н. Патент РФ №2275657, 2006 г. Способ обнаружения и распознавания неоднородностей в поверхностном слое грунта (варианты) и виброщуп для его реализации.
14. Бубнов Е. Я., Гуцин В. В., Миннегулов А. К., Рубцов С. Н. Использование упругих полей для обнаружения приповерхностных неоднородностей. // Электронный журнал «Техническая акустика» <http://www.ejta.org>. 2009, 1