

УДК 534.6

ИНФРАЗВУК – ЭКОЛОГИЧЕСКИ ВРЕДНЫЙ ФАКТОР В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Г.И. Сокол, канд.техн.наук, доцент

Днепропетровский национальный университет
49625 г. Днепропетровск – 10, ГСП, пер. Научный, 13. Email:gsokol@ukr.net

Выявлены источники инфразвука в ветроэнергетике, вредно влияющее на экологическую обстановку. Характер общего шума ветроэнергетической установки (ВЭУ) определяется излучением звука отдельных ее узлов и шумами набегающего ветрового потока. Предложены новые методики расчета характеристик акустических полей, генерируемых узлами ВЭУ. Разработана программа-методика для измерений характеристик шума ВЭУ.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ шума ВЭУ предполагает как теоретические исследования на основе моделей процесса генерирования, так и его экспериментальные исследования с измерением характеристик. Анализ необходим для разработки мероприятий, направленных на снижение уровня звукового давления (УЗД) до требуемого по санитарным нормам Украины [1]. Актуальность проблемы снижения УЗД шумов особенно на инфразвуковых частотах не вызывает сомнений [2]. В ГКБ «Южное» совместно с Северо-восточным научным центром проводились измерения инфразвука от ВЭУ, входящих в состав Аджигольской электростанции. Показано [3], что уровень инфразвука от одного работающего ветроагрегата не превышает уровень общего шума на населенной местности и составляет 85 дБ на расстоянии 400м от ВЭУ. Решение задачи о снижении шумов ВЭУ остается актуальным и в настоящее время, так как за рубежом принят допустимый уровень шумов от ВЭУ величиной 45 дБ на расстоянии 100 – 400 м. [4, 5]. Проведение новых исследований шумовых характеристик ВЭУ, в частности, инфразвуковых, обусловлена еще и необходимостью снижения их уровня на рабочем месте оператора, где он составляет 87- 110 дБ [3]. Общий шум ВЭУ определяется излучением звука от отдельных ее узлов [6]. В ветроагрегатах ВЭУ - 250С и ВЭУ-500 разработки ГКБ «Южное» основные узлы являются типичными излучателями инфразвука [7]. Частота вращения их трехлопастного ветроколеса составляет 47,6 об/мин. Тем самым ветроколесо ВЭУ генерирует в окружающую среду инфразвук с частотой 2,4 Гц. В [8] представлены проектные данные ветродвигателя «Эсперо» с тремя лопастями. Число оборотов ветроколеса в нем составляет 67 об/мин. Ветроколесо генерирует инфразвук с частотой 3 Гц. Одним из источников инфразвукового шума ветроагрегатов ВЭУ-250С и ВЭУ-500 является пустотелая башня, состоящая из отдельных секций [9]. Частоты вихревого звука в ветроэнергетике также являются инфразвуковыми [10].

Целью настоящей работы является разработка методик, позволяющих рассчитать характеристики акустических полей ветроэлектрических установок.

1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЕТРОКОЛЕСА

При периодическом воздействии на среду вращающихся лопастей в ней генерируется звуковое поле [2, 11, 12]. Для описания звукового поля генератора в виде ротора применим

теорию Л.Я. Гутина, описывающую звуковое поле воздушного винта [13]. На каждый элемент колеса действуют две силы: аэродинамическая сила и сопротивление вращательному движению. Из основного закона механики следует, что этот элемент, в свою очередь, воздействует на среду с равными по величине и противоположно направленными силами. Точки приложения этих сил будем считать сосредоточенными в одной плоскости, так как осевое протяжение лопасти ничтожно мало в сравнении с длинами волн первых гармоник; назовем ее плоскостью вращения (например, протяженность лопасти ВЭУ – 250С составляет 12 м, а длина волны первой гармоники на частоте 2, 4 Гц равна 141,6 м).

Рассмотрим элемент лопасти, расстояние до которого от оси ветроколеса равно R ; пусть dR – радиальная длина его и a – ширина, измеренная в проекции на плоскость вращения. Силы, с которыми элемент воздействует на среду, обозначим: $A(R) dR$ (параллельна оси и направлена обратно направлению оси ветроагрегата, ось колеса ветроагрегата считаем совпадающей с осью ротора, ее положительное направление - от головки ветроагрегата в пространство) и $B(R) dR$ направлена обратно вращательному движению ротора ветроагрегата.

$$n \int_0^{R_0} A(R) dR = n \int_0^{R_0} dP = P \quad ; \quad n \int_0^{R_0} B(R) dR = n \int_0^{R_0} dM = M$$

где n – число лопастей; R_0 – длина лопасти; P – аэродинамическая сила, приводящая лопасть в движение; M – момент во вращательном движении лопасти.

Допустим, что силы равномерно распределены по ширине лопасти. Если прохождение лопасти началось в момент времени $t = 0$, то оно будет закончено во время τ . Периодически повторяющиеся с периодом T силы разложим в ряд Фурье

$$F_1(t) = \begin{cases} A(R) \frac{R}{a} dR d\theta & \dots & (0 < t < \tau) \\ 0 & \dots & (\tau < t < T) \end{cases} = \sum_1^{\infty} A_m \cos(mnat - \varepsilon_m) + A_0;$$

$$F_2(t) = \begin{cases} B(R) \frac{R}{a} dR d\theta & \dots & (0 < t < \tau) \\ 0 & \dots & (\tau < t < T) \end{cases} = \sum_1^{\infty} B_m \cos(mnat - \mu_m) + B_0$$

Здесь θ - угол, $d\theta$ - элементарный угол в плоскости вращения, ε_m, μ_m - фазы, A_m, B_m – амплитуды гармоник, m – номер гармоники. При этом

$$A_m = \frac{2}{m\pi} A(R) \cdot \frac{R}{a} \sin\left(m\pi \frac{\tau}{T}\right) dR d\theta \quad ; \quad B_m = \frac{2}{m\pi} B(R) \cdot \frac{R}{a} \sin\left(m\pi \frac{\tau}{T}\right) dR d\theta ;$$

Для первых гармоник имеем

$$A_m = \frac{n}{\pi} A(R) dR d\theta ; \quad B_m = \frac{n}{\pi} B(R) dR d\theta .$$

Потенціал скоростей, обумовлений зосередженою силою з компонентами X, Y, Z , визначається згідно [13] з урахуванням того, що точка спостереження лежить в площині X, Y на відстані r

$$\varphi = \frac{-i}{4\pi \rho k c} X \left(\frac{1}{2r} + \frac{ik}{r} \right) \cdot \frac{e^{-ikr}}{r} x ,$$

де ρ - густина середовища, k - хвильове число, x - координата.

Вираз для звукового тиску по [13]

$$p = \frac{m\omega_l}{2\pi cr} \left[-P \cos \vartheta + \frac{nc}{\omega_l R_2^2} M \right] J_{mn}(kR \sin \vartheta) .$$

здесь ϑ - кут характеристики напрямленості, $x / r = \cos \vartheta$ - напрямлення косинуса радіуса-вектора, ω_m - кругова частота кожної з гармонік, r велико в порівнянні з довжиною хвилі і діаметром лопасті, де ω_l - кругова частота основного тону. $J_{mn}(kR \sin \vartheta)$ - Бесселева функція 1-го роду n порядку, c - швидкість звуку.

Результати розрахунків, представлені графічно, зображають залежність звукового тиску на відстані від вітроагрегату від 0 до 300 метрів при електричній потужності вітроагрегату 250 кВт, при максимальній швидкості вітру 10 м/с (см. рис. 1). Тут представлена характеристика напрямленості випромінювача.

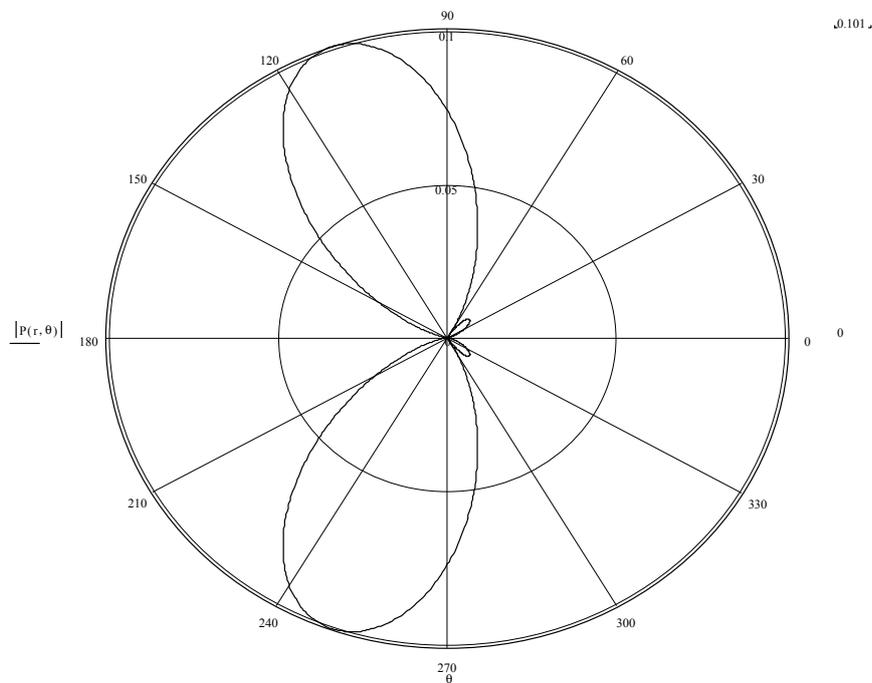


Рис. 1. Характеристика напрямленості акустичного поля вітроколеса.

Для проведения расчетов составлены алгоритм и программа на языке MAPLE. Из данных расчетов видно, что уровень звукового давления очень низкий. На расстоянии 300м от ветроагрегата ВЭУ - 250С он составляет менее 80 дБ. Эта цифра отвечает санитарным нормам.

Излучаемая акустическая мощность вычисляется по формуле [13]

$$W = - \int_0^{\pi} \frac{p^2}{2\rho c} 2\pi r^2 \sin \vartheta d\vartheta.$$

В [10] показано, что при обтекании ветровым потоком лопастей возникает явление «вихревого» звука. Для лопасти длиной 12м и скоростей воздушного потока, меньших 10 м/с по формуле Стокса рассчитана частота основного тона. Определено, что она является инфразвуковой и оставляет примерно 0,4 Гц.

2. РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛОСТЯХ БАШНИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

2.1. Постановка задачи

Башня ВЭУ-250С представляет собой три полых конических секции. Общий вид секций башни представлен в конструкторской документации ГКБ «Южное» [7]. Верхняя ее секция, на которой установлена головка с механизмами, имеет диаметры 2200 мм и 1691 мм, длину 15285 мм. Средняя секция имеет диаметры 2200 мм и 2600 мм, длину 8855 мм. Нижняя секция выполнена длиной 8860 мм, имеет диаметры 2600 мм и 3200 мм. В днищах конических секций выполнены люки размерами 800 на 820 мм.

Секции башни ВЭУ с точки зрения акустических представлений, аппроксимируем отрезками труб конечной длины. Форма секций – коническая труба, приближенная к цилиндру. Применим методику расчета резонансных частот колебаний воздуха внутри труб цилиндрической и конической формы конечной длины к секциям башни ВЭУ. Распространение звука внутри секций башни будем рассматривать в линейном приближении.

С учетом форм, размеров секций и наличия в них открытых люков, верхнюю и среднюю секции башни аппроксимируем трубой конечной длины, открытой с двух концов. Нижнюю секцию, установленную на фундаменте, аппроксимируем трубой конечной длины, закрытой с одного конца крышкой.

Возбудителем акустических колебаний в верхней секции башни является шум от механизмов, работающих в головке ВЭУ. В средней и в нижней секциях акустические колебания возбуждаются шумами, передающимися из предыдущей секции.

В первом приближении аппроксимируем секции башни цилиндрическими трубами, во втором приближении – коническими.

2.2 .Методика и результаты расчетов

При аппроксимации секций башни трубами цилиндрической формы имеем: резонансные частоты двух верхних секций башни определяются как собственные частоты трубы с открытыми концами, резонансные частоты нижней секции - как собственные частоты для трубы, открытой с одного конца и замкнутой жесткой крышкой с другого конца [14]. Результаты численного расчета первых пяти собственных резонансных частот для каждой из трёх секций башни показали [15], что в акустическом поле средней и верхней секции содержится инфразвуковая составляющая. Значения резонансных частот в герцах следующие.

Верхняя секция: 28.7; 47.8; 67.0; 86.1; 105.2. Средняя секция: 19.1; 38.3; 57.5; 76.7; 95.9. Нижняя секция: 11.1; 22.2; 33.3; 44.4; 55.6.

Методика и результаты расчета резонансных частот воздушных полостей секций башни ВЭУ, если они аппроксимированы трубой конечной длины конической формы, представлены в [16-18]. Коническая труба резонирует на частотах, отличных от цилиндрической трубы. Методика позволяет рассчитать частоты, на которых достигает максимумов функция безразмерной активной части сопротивления излучения в сечении, где возбуждаются акустические колебания (то есть в сечении узкой части секции или в горле). Методика составлена с учетом результатов работы [10] и подробно изложена в [19] в применении к трубам в виде рупоров. Для выполнения расчетов составлена программа на языке Maple 6.

На рисунках 2 и 3 представлены данные расчетов для верхней и средней секций в двух случаях, когда секции моделируются цилиндрической и конической трубой конечных размеров. По вертикальной оси отложены значения (обозначены α), по горизонтальной оси отложены значения резонансных частот (обозначены f). Равные по величине значения α соответствуют модели цилиндрической трубы. На рисунке 4 представлены данные расчетов для нижней секции. Секция моделируется цилиндрической трубой конечных размеров.

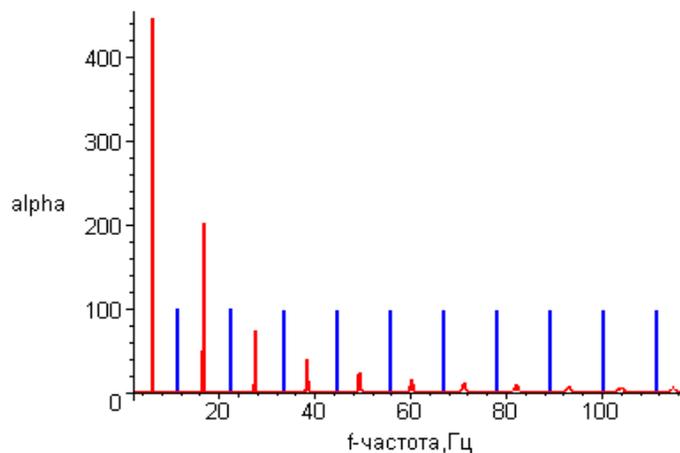


Рис. 2. График значений максимумов функция безразмерной активной части сопротивления излучения для верхней секции башни ВЭУ

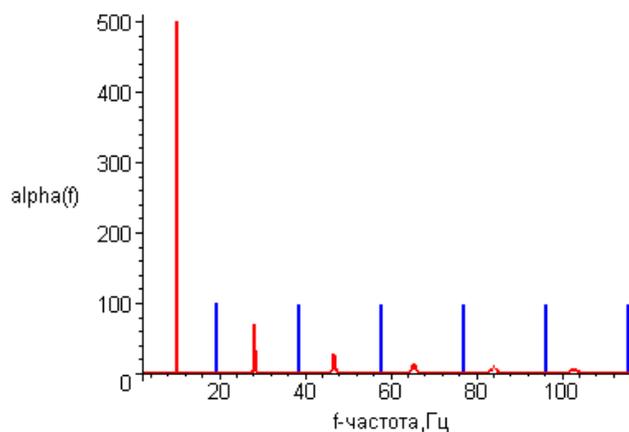


Рис. 3. График значений максимумов функция безразмерной активной части сопротивления излучения для средней секции башни ВЭУ

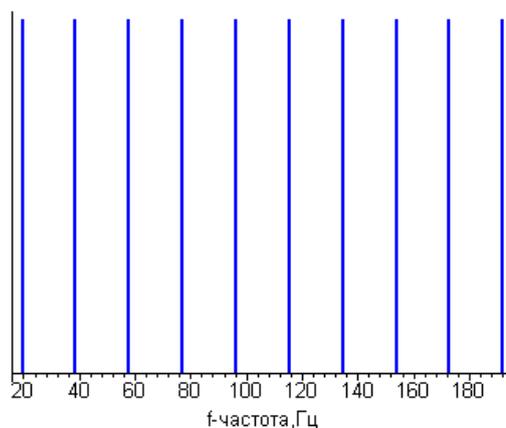


Рис. 4. График значений максимумов функция безразмерной активной части сопротивления излучения для нижней секции башни ВЭУ

Из рисунков видно, что расчеты, выполненные по методике, учитывающей коническую форму, дают возможность определить нижнюю резонансную частоту, которая при аппроксимации секций цилиндрическими трубами, теряется. Секции башни являются типичными инфразвуковыми и низкочастотными звуковыми резонаторами.

Распространение звука внутри секций башни необходимо рассматривать в линейном и нелинейном приближении. Линейный случай позволил рассчитать частоту резонансных колебаний инфразвуковых и звуковых волн. Возникновение и распространение звука высших гармоник в секциях башни с реализацией в узком сечении возбуждающей волны большой амплитуды является нелинейным процессом. Нелинейность характеризуется перекачкой энергии первой гармоники в высшие. Причём 90 % всей энергии перекачивается во вторую гармонику. В [20] разработана методика расчета амплитуды второй гармоники при распространении шумов с высоким УЗД в воздушных полостях секций башни.

Основание для модели волноводного распространения второй гармоники в секциях башни: при числе оборотов вала мультипликатора 1500 об/мин, частота генерируемого звука равна 238 Гц. Частота второй гармоники - 476 Гц, длина волны - 0,7 м. На длине секций башни 15285 мм, 8855 мм и 8860 мм укладывается более десяти длин волн второй гармоники..

Аналитическая зависимость, описывающая изменение амплитуды второй гармоники при распространении ее вдоль секции конической формы

$$p_{2 \text{ кон}} = \frac{cp \frac{2}{m-1}}{x + x_0} \ln \left(\frac{x + x_0}{x_0} \right)$$

где p_m - амплитудное значение звукового давления в горле секции, x_0 – координата, c – скорость звука.

Получено, что амплитуда второй гармоники существенно возрастает от узкого к широкому сечению секций, увеличиваясь на 20 дБ. Это требует проведения мероприятий по гашению второй гармоники.

В дальнейшем предполагается проведение натурных измерений акустических характеристик для ВЭУ более высокой мощности (ВЭУ - 500 С) по новой программе – методике [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выяснено, что характер общего шума ВЭУ определяется излучением звука отдельных ее узлов. Источниками инфразвука являются ветроколесо, воздушные полости секций башни, поток, обтекающий лопасти.
2. Распространена методика расчета УЗД в дальнем поле воздушного винта на проведение расчетов характеристик акустического поля ветроколеса.
3. Разработаны физическая и математическая модели генерирования звука в воздушных полостях секций башни. Секции аппроксимированы акустическими трубами – резонаторами. Расчетным путем получено, что акустические колебания в отдельных секциях ВЭУ-250 С имеют следующие собственные резонансные частоты: в верхней секции $f = 6,07; 16,62; 27,46; 38,37; 49,29; 60,22; 71,15; 82,10; 93,04; 103,99; 114,95$ Гц; в средней секции: $f = 10,00; 28,20; 46,75; 65,45; 84,05; 102,70$ Гц; в нижней секции: $f = 19,18; 38,37; 57,56; 76,74; 95,93; 115,12; 134,31; 153,49; 172,68; 191,87$ Гц. Нижняя частота или первая мода колебаний является инфразвуковой.
4. Разработана методика расчета амплитуды второй гармоники при распространении шумов с высоким УЗД в воздушных полостях секций башни.
5. Определено, что инфразвуковая частота вихревого звука, генерируемого при обтекании лопастей воздушным потоком, составляет примерно 0,6 Гц..
6. Разработана программа и методика, определяющая объем, порядок и место проведения работ по измерению акустических характеристик ВЭУ-500 С с целью выбора мероприятий по гашению шумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3 6. 037 – 99. – Київ: Міністерство охорони здоров'я України, Головне санітарно епідеміологічне управління, 1999. – С. 79.
2. Сокол Г.И. Особенности акустических процессов в инфразвуковом диапазоне частот. – Днепропетровск: Промінь, 2000. - 136 с.
3. Ребров Л.В. Отчет о результатах информационных исследований по теме: Экологическое обследование АВЭ-250 С. Х: СВНЦ Акад. Наук Украины, 1993. - 96 с.
4. Hagg F. European Community Wind Energy // Conf.:Int. Cont. Madrid, 10-14 Sept., 1990. Noise Windirections. –1994.- v. 13, № 3. - P. 25-26 .
5. OVG: 950m. Standardten zu Hausern // Energ, Spectrum. – 1998. – v. 13, № 7. - P. 8 – 12 .
6. Сокол Г.И., Стецюк Е.В. Анализ шума ветроагрегатов // 5-та міжнар. Молод. Наук.-практ. Конф. “Людина і космос”: Дніпропетровськ, 16-18 квітня 2003, 3б. Тез. - Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2003. - С. 197.
7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ветроэлектрической установки ВЭУ – 500 № 90.9990.0000.0000.01.0.ТО, ГКБ «Южное», 1997. - 65 с.
8. Абрамовский Е.Р. Методика последовательных приближений в расчетах аэродинамических и энергетических параметров ветродвигателей // Вісн. Дніпроп. ун-ту, сер. Механіка. – 2000.- Вип. 3, т. 1. - С. 3- 11 .
9. Сокол Г.И. К расчету резонансных частот секций башни ветроэнергетической установки // 1-ша міжнар. Наук.-практ. Конф. “Науковий потенціал світу/ 2004”: Дніпропетровськ, 1-15 листопада 2004. – т. 77. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. С 18-19.

10. *Завьялова М. П., Сокол Г.И.* Природа вихревого звука в ветроэнергетике // 7-ма Міжнар. Молод. Наук.-практ. Конф. “Людина і космос”: Дніпропетровськ, 13-15 квітня 2005. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2005. - С. 15.
11. *Русских Д. С., Сокол Г.И.* К расчету характеристик акустического поля ветроколеса ВЕУ – 500С // 7-ма Міжнар. Молод. Наук.-практ. Конф. “Людина і космос”: Дніпропетровськ, 13-15 квітня 2005. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2005. - С. 28.
12. *Сокол Г.И., Велюс П.В.* Расчет звукового давления в дальнем поле, создаваемом ветроэлектрической установкой // 4-та міжнар. Молод. Наук.-практ. Конф. “Людина і космос”: Дніпропетровськ, 5-7 червня 2002. Зб. тез. - Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2002. - С.462.
13. *Гутин Л.Я.* К теории приемного рупора // В кн.. Избранные труды. – Л: Судостроение, 1977, с. 37 – 53 .
14. *Скучик Е.* Основы акустики. - М.: Мир, 1976, т. 1,2. - 542 с.
15. *Сокол Г.И., Иваницкий Ю.Д.* Расчет резонансных частот секций башни ветроэлектрической установки ВЭУ-500 // 5-та міжнар. Молод. Наук.-практ. Конф. “Людина і космос”: Дніпропетровськ, 16-18 квітня 2003, Зб. Тез. - Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2003. - С. 201.
16. *Сокол Г.И.* Моделирование резонансных явлений в секциях башни ветроэнергетических установок // Тр. Междунар. Конф. «Моделирование и исследование устойчивости динамических систем (DSMSI – 2005)»: Киев, 25-27 мая 2005 – Киев: КНУ, 2005. – С. 292.
17. *Сокол Г.И., Пасечный Е.В.* Резонансные явления в башне ветроэлектрической установки ВЭУ-250С // Вісн.ДНУ, сер. Механіка. -2003. - вип.7, т.1. - С.114-123.
18. *Сокол Г.И., Пасечный Е.В.* Резонансные явления в башне ветроэнергетической установки ВЕУ-250 // 4-та міжнар. Молод. Наук.-практ. Конф. “Людина і космос”: Дніпропетровськ, 5-7 червня 2002. Зб. тез. - Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2002. - С. 472.
19. *Сокол Г.И.* Определение максимума второй гармоники в рупоре конической формы. - Дн.: ГНТБ Украины, Деп. №1376-УК92 от 31.08.1992 - 6 с.
20. *Сокол Г.И., Махиня А.А.* Нелинейные акустические волны в конических отсеках башни ветроэлектрической установки ВЕУ-500 С// 4-та міжнар. Молод. Наук.-практ. Конф. “Людина і космос”: Дніпропетровськ, 5-7 червня 2002. Зб. тез. - Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2002. - С. 469.
21. *Определение акустических характеристик узлов ВЭУ - 500 С и ее дальнего акустического поля: Программа и методика № 14.6970.559 ПМ.* - Днепропетровск: ГКБ «Южное», 2002. - 8 с.