

**О РЕЗУЛЬТАТАХ РАБОТ ПО НИЗКОЧАСТОТНЫМ  
АКУСТИЧЕСКИМ КОЛЕБАНИЯМ УЧЕНЫХ И ИНЖЕНЕРОВ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО  
НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА (ДНУ)**

**Г.И.Сокол, Е.В.Горбенко**

*Днепропетровский национальный университет, физико-технический факультет,  
кафедра технической механики  
49050 г. Днепропетровск - 10, ГСП, пр Гагарина, 72.  
Раб. тел (056) 373-12-60. E-mail: [gsokol@ukr.net](mailto:gsokol@ukr.net), [lizaveta.tv@rambler.ru](mailto:lizaveta.tv@rambler.ru)*

В статье представлены работы, выполненные учеными Днепропетровского национального университета по низкочастотным акустическим колебаниям за период с 1975 года по настоящее время. В них отражены теоретические и экспериментальные исследования акустических систем, предназначенных для генерирования колебаний в низкочастотном диапазоне.

**ВВЕДЕНИЕ**

На кафедре прикладной механики и в лаборатории ПНИЛ САКУ под руководством профессора И. К. Косько, начиная с 1975 года, проводились работы, в которых отражены теоретические и экспериментальные исследования акустических систем, предназначенных для генерирования колебаний в низкочастотном диапазоне [1 - 4]. Работы велись на протяжении 13 лет (с 1975 по 1988г.г), были созданы уникальные экспериментальные установки. Под руководством И.К. Косько работали д.т.н. Г.И. Сокол, к.т.н. В.И. Конох, к.т.н. Н.П. Белик, к.т.н. А.Г. Головач, к.т.н. А.Я. Рахленко, к.т.н. А.В. Польшин, к.т.н. Ю.С. Михеев, А.И. Антоненко, И.К. Чернега, В.Д. Бондарев, Н.А. Голомий, О.В. Евкин, Ю.В. Тарасенко, В.Н. Рошаховский, А.И. Седых, А.И. Андреев, Е.Е. Козловский, А.С. Бабич, С.С. Алефиренко. Теоретические и экспериментальные достижения нашли применение в научно-исследовательских работах ДГУ (Днепропетровский государственный университет). После кончины профессора И.К. Косько работы по исследованию продолжила профессор Сокол Г.И. [5] Результаты работ представлены в 20-ти научно-технических отчетах, защищены 28 авторских свидетельств СССР, из них 3 авторских свидетельства (№ 202171, № 281608, № 272869) внедрены в научно-исследовательский процесс в ДГУ.

Целью настоящей работы является исследование результатов, полученных кафедрой прикладной механики Днепропетровского национального университета.

**ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Профессор И.К. Косько взялся за новую для РКТ тему по изучению особенностей низкочастотных акустических колебаний (НЧАК) не случайно. Этому способствовал ряд причин.

Анализ имеющейся технической и медицинской литературы показывал, что не полностью еще изучены вопросы физиологического воздействия инфразвука на биологические объекты и вопросы защиты человека.

Проведенний комплекс обзорних досліджень дозволив розробити технічне завдання на проектування нових макетів низкочастотних акустических излучателів.

Можно дати коротку історическую справку о комплексі досліджень, проведених за 15 років роботи колективу. Це аналіз принципів генерування акустических волн (Г.І. Сокол), аналіз і огляд научних робіт по впливу НЧАК на людину (А.І. Седих), винахід барабанного генератора (І.К. Чернега), мембранного генератора с рупором (В.Д. Бондарев, Г.І. Сокол, В.І. Конох, Л.П. Скочко, Ю.В. Тарасенко), генератора на основі пульсуючих потоків і струй (А.Г. Головач, Г.І. Сокол), термоакустического генератора (Н.П. Белик, А.В. Польшин) [2], генератора, існуючого принцип дії на основі взаємодії волн різної частоти (Г.А. Харитонова), групової низкочастотної системи антенного типу (А.І. Евкін), вивчення фокуруючих ефектів на низьких частотах (А.І. Бабич), методів захисту (С.С. Алефиренко).

Основні проблеми генерування інфразвукових волн в атмосфері перераховані в статті [3]. Для дальнішого дослідження і рішення перерахованих проблем в 1977 році були спроектовані і виготовлені опытні образці генераторів НЧАК.

Поэтому роботи 1977 року проводились в напрямленні створення нових моделей і реальних опытних образців генеруючих пристроїв. Однією з перших була створена модель мембранного генератора барабанного типу.

Експериментальні дослідження і заміри рівнів акустического тиску здійснювались с допомогою вимірювальної апаратури фірми «Брюль і Кьєр». Було показано, що, як правило, низкочастотні акустическі пристрої мають малий к.п.д. і излучають не на одній заданній частоті, а в широкому діапазоні частот. В зв'язі с цим на кафедрі були початі роботи, існуючі ціллю дослідити фактори, впливаючі на к.п.д. акустических генераторів [4].

Експериментальною базою для дослідження інфразвукових систем стала науково-дослідницька лабораторія, розміщена на території корпусу №6 державного університету.

Она включала в себе, крім основного будинку, батарею баллонів низького тиску – 13 атм, існуючу з 12 газгольдерів, існуючих 2160 м<sup>3</sup> стисненого повітря і ампульну 48-баллонну батарею, призначену для зберігання 21,600 м<sup>3</sup> стисненого повітря під тиском 250 атм.

Полезная площа приміщення складає 1440 м<sup>2</sup>. Проект реконструкції, виконаний Дніпровським філіалом «Іпромашпром», передбачав перепланування і переобладнання існуючого будинку.

Експериментальна база лабораторії дозволила проводити випробування установок для генерування НЧАК, працюючих на стисненому газі або повітрі, а також установок с застосуванням відкритого вогню. К корпусу лабораторії примыкала огорожена зона, котра дозволила дослідити акустическі системи середньої потужності.

В 1980г вироблена переделка конструкції генератора барабанного типу с ціллю усунення недоліків приводячих до нестійкої роботи і небажаними коливаннями мембран. С ціллю була видалена одна секція, а на залишену було встановлено два циліндра. Циліндри встановлені по центру мембран, що привело до практично центральному прикладанню збуджуючого зусилля.

Максимальна амплітуда коливань мембран, при котрій установка працювала стійко, зросла до 100-120 мм, т.е. в два рази більше по порівнянню с аналогічним результатом, отриманим до переделки. На односекційній установці отримана

мощность порядка 2 кВт, т.е. такая же как и при работе двухсекционной при амплитуде 57 мм.

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что основным источником потерь энергии при работе установки барабанного типа является негерметичность полостей резонаторов. Это приводит к снижению величин акустико-механического к.п.д.

Данные выводы хорошо согласуются с результатами, полученными при работе двухсекционной и односекционной установки. Для двухсекционной установки к.п.д. примерно в два раза выше чем для односекционной. Это объясняется тем, что потери остаются неизменными, а излучаемая энергия каждой секции увеличивается в два раза при совместной работе двух секций.

На первом этапе были исследованы модели сирен, т.е. такие конструкции, которые обеспечивают генерирование акустических волн за счет прерывания воздушного потока с низкой частотой. Несколько позже были исследованы конструкции генерирующих устройств, в основу которых положено использование интерференции волн высокой частоты для получения низких частот. Были также исследованы пульсирующие системы действующие на основе пульсирующих воздушно-реактивных двигателей и ряд других [1].

Генераторы сиренного, пульсирующего типа обладают существенным недостатком – наличием широкого диапазона высокочастотных составляющих, а низкочастотные составляющие по амплитуде незначительны. Сделан вывод, что применение резонаторов позволяет увеличить долю основного низкочастотного тона в общем спектре частот.

Интерференционные генераторы низкочастотных волн свободны от этого недостатка, но ввиду низкого к.п.д. генерирование низких частот большой мощности не представляется возможным.

Разработана и изготовлена новая конструкция мембранного акустического генератора с рупором, где использована фазоинверсия и акустическая трансформация. С целью повышения эффективности отдачи генерирующей мембраны. Закончено изготовление рупора, что позволило также увеличить излучаемую акустическую мощность. Получена предварительная теоретическая оценка излучаемой акустической мощности этих генераторов. Для обеспечения рабочей частоты в интервале 20-25 Гц, который должен быть выше критической частоты рупора 17 Гц, появилась необходимость повышения приведенной жесткости мембраны. Это было достигнуто за счет введения дополнительной жесткости в виде пружины [5].

Разработана схема генератора ударной мощности с накоплением электрической энергии позволило бы резко повысить подводимую мощность (до десятков тысяч килоджоулей).

Увеличение акустической мощности низкочастотных генераторов можно получить за счет увеличения эффективной площади генерирующего элемента в предлагаемых конструкциях сферических излучателей, имеющих сравнительно небольшие габариты, но не исключающие возникновения технологических трудностей при их изготовлении.

Несомненно, профессор И.К. Косько большие надежды возлагал на излучатели, которые работали бы в переходном режиме. В кандидатской и в докторской диссертациях профессора И.К. Косько было показано, что наивысших значений амплитуды колебаний многомассовых систем с элементами, соединенными гибкими связями, достигают в переходном режиме работы система. Поэтому профессор И.К. Косько ясно видел принципиальные схемы мембранных акустических излучателей как многомассовые системы, элементы которых соединены гибкими связями. Достижение высоких значений

акустической мощности излучения профессор И.К. Косько связывал с высокими амплитудами перемещений мембран во время переходного режима работы.

При испытании генератора мембранного с рупором происходил перекос пружин, которые предназначены для увеличения приведенной жесткости генератора, определяющей частоту собственных колебаний мембраны.

Перекос пружин приводил к понижению добротности конструкции. Для устранения этого недостатка была произведена вторичная расточка гнезд под пружины на координатно-расточном станке, что позволило выдержать соосность гнезд под пружины и повысить добротность конструкции генератора.

Согласующим звеном мембранного генератора с окружающей средой является катеноидальный рупор.

Рупор состоит из отдельных секций, длина каждой из которых примерно один метр. Максимальный диаметр устья рупора превышает четыре метра. На рис. 1 приведен общий вид смонтированного катеноидального рупора [6].



Рис. 1 – Рупор мембранного генератора

Было выявлено, что теоретически и экспериментально не изучены процессы распространения волн и резонансные явления в рупоре катеноидальной (по гиперболическому косинусу) формы. Поэтому в работах [6] и были представлены результаты этих исследований. Задаваясь начальными и граничными условиями в горле рупора, было записано уравнение акустической волны в рупоре как суммы прямой и отражённой от устья волн. В результате решения уравнения получено аналитическое выражение для коэффициента излучения « $\alpha$ » (или безразмерной составляющей импеданса) в горле рупора катеноидальной формы.

Составлены алгоритм и программа для расчёта частотной характеристики коэффициента излучения, что позволило определить резонансные частоты катеноидального рупора заданной длины. Расчет проводился по программе, написанной на языке FORTRAN – 4.

Сравнение расчётных и экспериментальных данных позволило сделать вывод, что в горле рупора катеноидальной формы конечной длины резко выражены резонансные пики, обусловленные наличием отраженной волны. Значения резонансных частот, полученные расчетным путем и экспериментально, полностью совпадают, амплитудные же значения коэффициента излучения разнятся в 0,92 раза.

Теоретические и экспериментальные исследования резонансных явлений в рупоре позволили предложить новую принципиальную схему звукогенератора с рупором переменной длины. Особенно актуально предложенное решение в случае возбуждения колебаний не мембранным, а струйным устройством. Шум струйного устройства имеет ярко выраженные дискретные составляющие [6]. Вследствие конечных размеров рупор резонирует лишь на конкретных частотах.

Дальнейшие работы по исследованию волновых процессов в рупорах были направлены на исследование нелинейных эффектов, возникающих при реализации в горле рупора так называемой «волны конечной (или большой) амплитуды».

Аналитически выведены уравнения [7], описывающие функции звуковых давлений вторых гармоник  $p_2$  и их аналогов скоростей в зависимости от осевой координаты рупора  $x$ . Получены выражения для коэффициентов нелинейных искажений  $\nu$  для рупоров конической и катеноидальной форм.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: при реализации в горле рупора волны большой (или конечной) амплитуды распространение акустических волн вдоль рупора происходит с проявлением нелинейных эффектов. В частности, начинается генерирование высших гармоник; анализ изменения амплитуды второй гармоники показал, что распространяясь вдоль рупора она сначала растет, достигая максимума, а затем уменьшается; получены выражения для осевой координаты, где амплитуда второй гармоники достигает максимума. Из них видно, что максимум располагается к горлу рупора тем ближе, чем больше его показатель расширения.

В период с 2000 по 2004гг. кафедра технической механики уделяли большое внимание исследованию аэродинамических и акустических процессов при работе ветроэнергетических установок.

На основе выявленных закономерностей в генерировании акустических колебаний при работе ветроэнергетических установок определены источники инфразвука; распространены результаты решения задачи о расчетах уровня звукового давления от воздушного винта на составление методики расчетов акустического поля ветроколеса; предложена новая методика расчетов резонансных частот воздушной среды в секциях башни ветроэнергетической установки ВЭУ 500-С разработки ГKB "Южное"; аналитическим путем исследовано появление нелинейных волн в секциях башни; разработана программа и методика измерений характеристик акустических волн, в которой описана последовательность проведения измерений и определены места расположения микрофонов [1].

Наработки в области низкочастотных акустических колебаний кафедрой прикладной механики было решено использовать в интенсификации металлургических процессов.

Разработаны способы интенсификации разогрева металлолома и шихты введением в резонанс полости конвертера, и способ улучшения перемешивания ванны жидкого металла путем введения в нее разрывных капсул с фреоном. Результаты разработки научных основ по генерированию низкочастотных колебаний как гармонических составляющих периодических ударных волн предложено использовать для улучшения показателей в процессе выплавки металла. Это позволит повысить величину степени усвоения кислорода ванной жидкого металла [1].

Впервые разработаны научные основы процесса уничтожения насекомых акустическими волнами, что является частью технологии уничтожения вредителей растений акустическими колебаниями. Запатентован способ уничтожения насекомых акустическими волнами и устройство для его осуществления. Экспериментально

определены динамические характеристики тела отдельных особей вредителя растений – колорадского жука: масса, жесткость и резонансная частота.

Опробовано губительное действие акустических волн на колорадского жука в лабораторных условиях. Эффект гибели жука получен для колорадского жука массой 100мг при воздействии на него акустическими волнами частотой 1500 Гц с уровнем звукового давления 120 дБ. В полевых условиях соответствующий уровень достигнут не был и составил 110дБ [3, 8].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен обзор работ, проведенных на кафедре прикладной механики и ПНИЛ САКУ ДГУ с 1975 по 1988 г.г., по осуществлению генерирования акустических волн в малоисследованном низкочастотном диапазоне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сокол Г.И. Теоретические и прикладные исследования в механике, энергетике и машиностроении / А.А. Приходько, Е.Г. Гейда, В.С. Дудников, П.И. Кудинов, С.А. Летучая, В.И. Липовский, Е.А. Логвиненко, Г.И. Сокол – Вісник Дніпропетровського національного ун-ту. Сер. Ракетно-космічна техніка. - 2001. - вип. 5.– С. 160-170.
2. Беляев Н.М. Термоакустические колебания газожидкостных потоков в сложных трубопроводах энергетических установок / Н.М. Беляев, Н.П. Белик, А.В. Польшин. – Донецк: Вища шк., 1985. – 160 с.
3. Сокол Г.И. О влиянии низкочастотных акустических колебаний на живые организмы / Г.И. Сокол, А.В. Сокол. – Акустический вестник. -2001.- т.4, №3.– С. 67-79.
4. Сокол Г.И. О результатах работ по низкочастотным акустическим колебаниям – Вісник Дніпропетровського національного ун-ту. Сер. Ракетно-космічна техніка. - 2003. -вип. 6.– С. 156 - 175.
5. Сокол Г.И. Особенности акустических процессов в инфразвуковом диапазоне частот. - Днепропетровск: Промінь, 2000. - 136с.
6. Сокол Г.И. Двигательные установки летательных аппаратов как генератора инфразвуковых волн. – Днепропетровск, 1986. –178 с.
7. Сокол Г.И. О нелинейных эффектах, возникающих при распространении звука в рупорах. – Деп. ВИНТИ № 4793-В91 Деп.от 25.12.1991 р. - 14с.
8. Акустичний спосіб знищення колорадського жука і пристрій для його здійснення: Пат.25548 Україна, МКИ А 01 М 1/04, А 01 М 1/08. А.В. Сокол, Г.І. Сокол, Т.В. Сокол (Україна); - № 97041627; Заявл.07.04.97; Опубл. 25.12.98, Бюл. № 6. – 2с.