

Препринт № 467

*Н.А. Митяков, В.О. Рапопорт, В.А. Зиничев,
Г.П. Комраков, Ю.А. Сазонов, Н. А. Рыжов*

**Система радиоакустического зондирования
атмосферы на основе стенда "Сура"**

Нижегород – 2001

**Н.А. Митяков, В.О. Рапопорт, В.А. Зиничев, Г.П. Комраков,
Ю.А. Сазонов, Н.А. Рыжов**

Препринт №467 – Нижний Новгород: НИРФИ, 2001, 19 с.

**Система радиоакустического зондирования атмосферы
на основе стенда "Сура"**

УДК 534.222; 537.874

Разработана уникальная система радиоакустического зондирования атмосферы (РАЗ) на основе стенда «Сура». В состав системы входят радар, работающий на частоте 8,9 МГц, и акустический излучатель мощностью 1000 Вт, работающий на частоте 18–20 Гц. Акустический излучатель состоит из сирены и согласующего рупора. С помощью оригинальной схемы подключения передатчика «Бриг» к антенне имеется возможность работы передатчика в непрерывном режиме с мощностью 1000 Вт. Для выделения рассеянного сигнала применяется фурье-анализ.

Система радиоакустического зондирования атмосферы на основе стенда «Сура» позволит проводить исследования динамических процессов в атмосфере (турбулентность, конвективные процессы, внутренние гравитационные волны) в диапазоне высот 0,5–15 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 01-02-16680и, № 01-02-81009к).

1. Введение

Традиционно системы радиоакустического зондирования атмосферы (РАЗ) дециметрового и метрового диапазонов волн используются для получения температурных профилей нижней атмосферы до высоты 2–3 км. В НИРФИ еще в 1991 году была создана нетрадиционная система РАЗ в декаметровом диапазоне длин волн, которая по своим параметрам превосходила все известные установки. С помощью этой установки была разработана методика экспериментов и получены профили температуры с малой (около 1 градуса) погрешностью в диапазоне высот 0,3–5 км [1]. В более поздних работах (см. [2]) было показано, что возможности декаметровых систем РАЗ не ограничиваются снятием температурных профилей. На основе фазового метода РАЗ разработаны методики исследования динамических процессов в атмосфере (таких, как крупномасштабная турбулентность, конвекция, внутренние гравитационные волны). К сожалению, указанная установка РАЗ была полностью утрачена в начале 90-х годов.

Ниже приводятся данные о системе радиоакустического зондирования атмосферы с использованием двух секций приемо-передающей антенны стенда "Сура". Приемо-передающая антенна стенда «Сура» состоит из трех одинаковых секций и представляет собой систему из 144 вибраторов, согласованных в диапазоне частот 4,5–9,0 МГц. Каждая из трех секций антенны имеет размеры 300 м x 100 м и содержит 4 ряда скрещенных диполей (в ряду 12 скрещенных диполей), излучающих правую (или левую) круговую поляризацию. Секция запитывается двухпроводной фидерной линией с волновым сопротивлением 120 Ом, которая в передающем режиме подсоединена к передатчику ПКВ–250, а в приемном режиме — к трансформатору для согласования фидерной линии с коаксиальным 75-омным кабелем. Основные характеристики проектируемой системы РАЗ: частота локатора — 8,9 МГц, мощность локатора — 1000 Вт, размеры приемной и передающей антенн — 300 м x 100 м, частота акустического излучателя — 18–20 Гц, акустическая мощность — 1000 Вт, длительность акустического импульса — 1–2 с, период повторения — 10–20 с. Оригинальная схема подключения передатчика "Бриг" к передающей антенне позволяет снизить на 120–130 дБ прямую наводку сигнала от передатчика на приемник. Последнее дает возможность использовать для радиолокации акустического импульса в атмосфере непрерывный режим работы передатчика. В качестве

акустического излучателя используется специально разработанная сирена. Система РАЗ на основе стенда "Сура" будет обеспечивать измерения профилей температуры и вариаций вертикальных движений в атмосфере в диапазоне высот от 0,5 до 12–15 км.

2. О методе РАЗ

Радиоакустический метод зондирования основан на Брэгговском рассеянии радиоволн периодической решеткой, создаваемой пакетом акустических волн. Частота принимаемого электромагнитного сигнала f сдвинута по отношению к частоте радара f_0 на частоту звука F , а длина акустической волны равна половине длины электромагнитной волны: $\lambda_a = \lambda/2$. По данным о длине и частоте звуковой волны

определяется скорость звука в атмосфере $c_a = 20,05\sqrt{T}$. Скорость звуковой волны является суммой скорости звука в неподвижной атмосфере (которая зависит только от ее температуры T) и продольной (вдоль луча радара) составляющей скорости ветра $v_s = c_a + v_r$.

Наблюдаемые в экспериментах достаточно быстрые (с квазипериодом 1–10 минут) вариации скорости звука обусловлены изменениями продольной составляющей скорости ветра. Фазовый метод позволяет выделять небольшие (порядка нескольких сантиметров в секунду) короткопериодные вариации продольной компоненты скорости ветра [2]. Эти вариации являются одним из наиболее информативных параметров, определяющих динамические процессы в атмосфере.

Возможности работы систем РАЗ в большом диапазоне высот лимитируются рядом факторов: мощностью и размерами излучателей акустических и радиоволн, ветровым сносом "акустического зеркала", ослаблением акустической волны за счет турбулентности и вязкости атмосферы [3,4]. Ослабление акустической волны уменьшается с ростом длины волны и практически незначительно в декаметровом диапазоне.

Снос акустической волны ветром приводит к смещению на поверхности Земли пятна сигнала РАЗ, отраженного сферической звуковой волной. Эффективный размер пятна определяется размером антенны радара (если размер акустического излучателя мал). При скорости ветра 10 м/с и высоте зондирования 5 км величина смещения пятна составляет 300 м. Поэтому в системах РАЗ, работающих в метровом диапазоне волн, для увеличения вероятности регистрации рассеянного сигнала используют несколько разнесенных в пространстве акустических излучателей [3]. Декаметровые системы РАЗ, у которых антенны локатора имеют

размеры 100 м и более, по ряду параметров имеют явное преимущество перед метровыми системами РАЗ.

Мощность рассеянного акустической волной сигнала на входе приемника радара определяется выражением [3]

$$P_s = \frac{P_t P_a \alpha k_i^2 L_a^2 N^2 \eta_a \eta_i}{2r^2} \Phi(L_a, L_t, L_r) \quad (1)$$

Здесь P_t и P_a — мощность передатчика локатора и акустического излучателя, $k_i = \frac{2\pi f}{c}$ — волновое число локатора, L_a — линейный размер акустического излучателя, N — число периодов акустического сигнала в импульсе, η_a, η_i — коэффициенты ослабления акустического и радиосигнала, r — расстояние до акустического импульса, $\alpha = 4,7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{Вт}$ — параметр, пропорциональный поперечнику рассеяния радиоволн на звуковой волне в воздухе. Численный коэффициент $\Phi(L_a, L_t, L_r)$ определяется размерами акустической, передающей и приемной антеннами и равен

$$\Phi = \frac{L_t^2 L_r^2}{(4L_a^2 + L_t^2 + L_r^2)^2} \quad (2)$$

В условиях, когда размеры передающей и приемной антенн равны ($L_t = L_r$) и существенно превышают размер акустической антенны, коэффициент $\Phi = \frac{1}{4}$. Примем $k_i = 0,2 \text{ м}^{-1}$, $L_a = 5 \text{ м}$, $r = 10 \text{ км}$, $N = 20$,

$F = 0,25$, $P_t = P_a = 1000 \text{ Вт}$, $\eta_a = \eta_i = 1$.

Для выбранных значений параметров величина сигнала локатора на входе приемника равна $P_s = 2,3 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}$. Для полосы анализа $\Delta F = 1 \text{ Гц}$ при температуре входа приемника $T = 10^5 \text{ К}$ мощность шумов составляет $P_N = 1,23 \cdot 10^{-18} \text{ Вт}$. Таким образом, в идеальных условиях (в отсутствие потерь) величина сигнала, рассеянного акустической волной, будет превышать мощность шума на 33 дБ.

3. Радиолокатор системы РАЗ

На основе приемо-передающей антенны стенда «Сура» создан и работает мезосферный локатор [5], с помощью которого исследуется динамика

атмосферы в диапазоне высот 60–80 км. В отличие от него радиолокатор системы РАЗ должен принимать рассеянные сигналы с высот от 0,5 до 15 км. Действующий мезосферный локатор работает в импульсном режиме. В качестве передающей антенны используется первая секция антенны стенда «Сура». Прием рассеянных сигналов осуществляется на третью секцию, причем ослабление сигнала передатчика в приемный тракт не превышает 40 дБ. Локатор может принимать сигналы с дистанций, превышающих 10 км. На более низких высотах приемник «забит» сигналами импульсного передатчика (которые возникают предположительно в результате переотражений мощного импульса в достаточно сложной антенно-фидерной системе). Поэтому мы стали искать другие пути построения радиолокатора системы РАЗ. В нашем распоряжении имеется передатчик «Бриг» с мощностью в непрерывном режиме 1000 Вт, работающий в диапазоне частот 3–25 МГц. Этот передатчик хорошо зарекомендовал себя в системе РАЗ на частоте 20 МГц [1]. Его сигнал достаточно чистый и устойчивый, без большого уровня модуляции гармониками сети 50 Гц. Передатчик имеет несимметричный выход на кабель 75 Ом. Все это выгодно отличает передатчик «Бриг» от передатчика мезосферного локатора. Дело в том, что используемые на стенде передатчики (штатные передатчики ПКВ–250 и передатчик мезосферного локатора) имеют симметричный выход, согласованный с фидерной линией антенны. Двухтактный выходной каскад передатчика имеет неконтролируемый разбаланс напряжений на двух проводах симметричной фидерной линии. Небольшой разбаланс (в пределах единиц процентов) практически не влияет на согласование передатчика с антенной. Однако результатом такого разбаланса является неконтролируемая несимметричная волна между фидером и землей. Размер фидерной линии для несимметричной волны определяется удвоенной высотой подвеса фидера и составляет 4–6 м. Несимметричная волна с вертикальной поляризацией полностью определяет ближнее поле антенны, вызывая переотражения импульсного сигнала на фидерах антенны, наводки сигнала передатчика на другие секции антенны и т.д. Именно поэтому была разработана другая схема соединения передатчика с антенной, которая практически исключает возбуждение несимметричной волны. В этой схеме 75-омный кабель с выхода передатчика «Бриг» должен быть соединен с симметричной фидерной линией антенны с помощью согласующего трансформатора. Маломощные согласующие трансформаторы уже имеются в каждой секции антенны и подключаются к фидерной линии при работе антенны

в приемном режиме. Поэтому мы могли смоделировать новую схему подключения передатчика к антенне, используя в качестве передатчика генератор Г4-153, который подключался к одной из секций антенны с помощью согласующего трансформатора. Сигнал на выходе генератора Г4-153 был равен $U_1=21$ В (что соответствует мощности около 6 Вт).

Измерения проводились в диапазоне частот 8,9–9,2 МГц для различных круговых поляризаций секций антенны. Напряжения U_1, U_2, U_3 с каждой секции антенны измерялись с помощью осциллографа. Слабые сигналы регистрировались с помощью приемника радара.

С учетом поглощения в кабелях ослабление сигнала для соседних секций 1-2 составляет: $\Gamma_{12} = \Gamma_{23} = 60-64$ дБ, а для пары 1-3 $\Gamma_{13} = 123-128$ дБ. Величина ослабления не зависит от поляризации в секциях 1,2,3 и мало меняется в выбранном диапазоне частот.

Таким образом, использование передатчика «Бриг» в системе РАЗ позволяет использовать для измерений локатор, работающий в непрерывном режиме, если приемник будет иметь динамический диапазон не менее 80 дБ. Высота, с которой приходит рассеянный сигнал, будет определяться временной задержкой акустического импульса.

Прямой сигнал передатчика вместе с сигналом, рассеянным акустическим импульсом, приходит на вход приемника, преобразуется на нулевую частоту и с помощью платы аналог-код записывается в память компьютера. Для выделения сигнала используются программы фурье-анализа. Дальнейшая обработка сигнала с целью определения профилей температуры и вертикальных движений в атмосфере производится по методикам, разработанным авторами (см. [1,2]).

4. Акустический излучатель

Частота радиолокатора равна $f=8,9$ МГц. Для того, чтобы выполнялись условия пространственного синхронизма $\vec{k}_i - \vec{k}_r = \vec{k}_a$ (здесь $\vec{k}_i, \vec{k}_r, \vec{k}_a$ – волновые векторы падающей, отраженной и акустической волн), частота акустического излучателя F должна изменяться в пределах

$$(c_a)_{\max} / c > \frac{F}{2f} > (c_a)_{\min} / c, \quad (3)$$

где c — скорость света, $c_a = 20.05\sqrt{T}$ — скорость звука, которая определяется максимальной $((c_a)_{\max} = 341,4 \text{ М/с}$ при 290 К) и

минимальной температурой $((c_a)_{\min} = 304 \text{ М/с}$ при 230 К) на высотах 1–10 км в летний полдень. В этих условиях пределы перестройки акустического излучателя составляют $F=18\text{--}20$ Гц. Мощность акустического излучателя должна составлять около 1000 Вт.

Анализ показал, что в готовом виде таких излучателей нет. Сигнальная сирена, оповещающая о включении передатчиков стенда «Сура», является стандартной сигнальной системой, излучающей на частоте 400 Гц. Трехфазный двигатель мощностью 3000 Вт вращает барабан диаметром 40 см с 8-ю отверстиями, которые являются прерывателями воздушной струи. В том же барабане смонтирован вентилятор, подающий воздух к прерывателю. Судя по описанию, звуковое давление сирены на расстоянии 10 м составляет 118–120 дБ (значению 120 дБ соответствует 1 Вт/м^2 , что соответствует излучаемой мощности сирены около 600 Вт). Конструкция существующей сирены исключает ее переделку на диапазон частот 18–20 Гц.

Наиболее близко к нашей задаче подходят сигнальные излучатели, которые устанавливаются на теплоходах [6]. Мощные тифоны для теплоходов производит Николаевский судостроительный завод (Украина). Тифоны типа «бас» излучают звуковые волны на частоте около 200 Гц и обеспечивают звуковое давление около 140 дБ. Струя воздуха, сжатого до 10 атм, вызывает колебания стальной пластины. Пульсация струи приводит к генерации звука. В этом устройстве частота звука определяется параметрами стальной пластины и оперативная перестройка частоты невозможна. Кроме того, тифон вряд ли может генерировать чистый тон с хорошей стабильностью частоты.

Рассмотрим различные варианты конструкции мощного акустического излучателя, для работы в диапазоне частот 18–20 Гц.

Напомним, как излучает звук пульсирующая сфера. Акустическая мощность пульсирующей сферы с радиусом r_0 равна [7,8]

$$P_{\text{ак}} = \frac{\rho c_a k^2 (4\pi r_0^2 u)^2}{8\pi(1 + k^2 r_0^2)} \quad (4)$$

Здесь u — скорость пульсаций площади сферы, $k = \omega/c_a$ — волновое число акустической волны.

Сфера большого размера ($kr_o > 1$) согласована со средой и мощность ее излучения не зависит от частоты:

$$P_{ак} = 2\pi\rho r_o^2 u^2 c_a. \quad (5)$$

Для излучателя малых размеров ($kr_o < 1$), помещенного на поверхность Земли (излучение в полупространство), независимо от формы излучателя

$$P_{ак} = \frac{\rho\omega^2 (Su)^2}{4\pi c_a}. \quad (6)$$

Здесь S — площадь поверхности (поршня или мембраны), пульсирующей со скоростью $u = \omega x$, где x — амплитуда колебаний поршня (мембраны). Для заданной амплитуды колебаний поршня с небольшими размерами мощность излучения пропорциональна четвертой степени частоты.

Из (4) следует, что минимальный размер согласованного излучателя должен составлять

$$(2r_o)_{\min} = \lambda/\pi \quad (7)$$

На частоте 19 Гц этот размер равен 6 м. Разумеется, такие гигантские излучатели сделать трудно. Реальные устройства (стандартные динамические головки и пр.) имеют размеры 0,2–0,3 м и являются для низких частот точечными излучателями. Для их согласования со свободным пространством требуются достаточно громоздкие сооружения типа резонатора Гельмгольца или согласующего рупора.

Ниже рассмотрены различные типы излучателей и согласующих устройств и выбраны наиболее подходящие для нашей цели.

Стандартные динамические головки типа 75–ГДН, которые применялись в [1], имеют резонансную частоту около 20 Гц и максимальную амплитуду колебаний мембраны 7 мм. Система из 30 головок будет иметь суммарную площадь мембраны около 1 м², и ее акустическая мощность составит 1,5 Вт. Использование резонатора Гельмгольца с добротностью $Q = 10$ увеличит мощность до 150 Вт (добротность $Q=10$ необходима для формирования полосы резонатора, которая должна составлять около 10 % от частоты акустической волны).

Увеличивать число динамических головок для увеличения мощности вряд ли целесообразно. Использование в [1] динамических головок типа 75 ГДН в резонаторе Гельмгольца было оправдано, поскольку на частоте

40 Гц мощность излучения возрастает в 4 раза по сравнению с мощностью на частоте 20 Гц.

Поршень с площадью 1 м^2 и амплитудой колебания 2 см обеспечивает акустическую мощность около 10 Вт и в паре с резонатором Гельмгольца мог бы решить нашу задачу. Однако конструкция такого излучателя представляется слишком сложной и дорогой.

Известно (см., например [8]), что наиболее мощным источником звука является пневматическая сирена, которая преобразует кинетическую энергию воздушной струи в акустические волны. Рассмотрим теорию сирены.

Пусть имеется емкость с газом, давление которого p_1 , и трубка с вентилем длиной l . При открытом вентиле в момент $t = 0$ газ движется по трубке с постоянной скоростью u вдоль оси x и попадает в атмосферу с давлением p_0 .

Напишем уравнение Эйлера:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (8)$$

или в интегральной форме для $\rho = \text{const}$

$$\rho \int_0^l \frac{\partial u}{\partial t} dx + \rho \frac{u^2(l) - u^2(0)}{2} = p(l) - p(0) = p_1 - p_0.$$

Заметим, что скорость в емкости с газом $u(0) = 0$. Тогда решение (8) при $u = 0$ в момент $t = 0$, когда открывается вентиль, имеет вид [8]

$$u = u_0 t h \frac{u_0 t}{2l}; \quad (9)$$

$$u_0 = \left(\frac{2 \delta p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

где $\delta p = p_1 - p_0$ — разность давлений.

Максимальную скорость движения u_0 можно записать иначе:

$$u_0 = c_0 \left(\frac{2 \delta p}{\gamma p} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ если учесть, что скорость звука в воздухе } c_0 = \left(\frac{\gamma p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Для примера зададим $\frac{\delta p}{p_0} = 7,5 \cdot 10^{-2}$, $\gamma = 1,4$, $c_0 = 340$ м/с. Тогда

скорость струи будет равна $u_0 = 112$ м/с. Время нарастания скорости

$\tau = \frac{2l}{u_0}$ составляет 0,01 с для значений $u_0 = 112$ м/с и $l = 0,5$ м.

Для струи газа, вытекающей из патрубка, канал которого имеет площадь S_0 , важными являются следующие параметры: производительность

(объемная скорость) струи газа $w = S_0 u_0$ (м³/с), пневматическая

мощность струи $P_{pn} = \frac{\rho S_0 u_0^3}{2}$ (Вт).

Пусть площадь выходного отверстия в патрубке изменяется по закону

$$S = S_0 + S_m e^{i\Omega t}, \quad (11)$$

где S_0 — площадь открытого отверстия, S_m — амплитуда его переменной части. Будем полагать сначала, что $S_m \ll S_0$. В этом случае правая часть в (6) должна быть дополнена акустической реакцией на давление. Простейшие расчеты сирены без учета сжимаемости газа приведены в [8]. Нам представляется уместным повторить и дополнить эти расчеты.

Если сирена нагружена на согласованный рупор, а длина патрубка мала

($k_a l \ll 1$, $k_a = \frac{\Omega}{c_a}$), то согласно [8] выражение (6) будет иметь вид

$$\frac{\rho u^2}{2} = p_1 - p_2 - (\zeta_0 + \zeta_p) V_w. \quad (12)$$

Здесь $\zeta_0 = \rho c(k^2 r^2 + ikr) S_0^{-1}$ — акустический импеданс патрубка,

$\zeta_p = \rho c S_p^{-1}$ — импеданс рупора, S_p — площадь горла рупора, V_w — переменная составляющая объемной скорости воздуха. Если $kr \ll 1$ (r — радиус отверстия патрубка), то $\zeta_0 + \zeta_p = \rho c S_p^{-1}$.

Будем считать, что скорость газа $u = u_0 + u_m e^{i\Omega t + i\varphi}$, причем $u_m \ll u$, если $S_m \ll S_0$. Тогда объемная скорость газа $V = S_0 u_0 + V_w$, а

$V_{\infty} = (S_0 u_m e^{i\varphi} + S_m u_0) e^{i\Omega t}$. Легко показать, что фаза $\varphi = 0$. В этом случае постоянная часть скорости u_0 определяется по-прежнему

выражением (8), а переменная часть равна $u_m = -\frac{S_m u_0}{S_p} \left(\frac{u_0}{c_a} + \frac{S_0}{S_p} \right)^{-1}$.

Переменная часть объемной скорости будет равна

$V_{\infty} = \frac{S_m u_0^2}{c_a} \left(\frac{u_0}{c_a} + \frac{S_0}{S_p} \right)^{-1}$, а мощность акустического излучения такой

системы

$$P_{ac} = V_{\infty}^2 \zeta_p = \frac{\rho u_0^3 S_m^2}{S_0} \frac{\frac{u_0}{c_a} \frac{S_0}{S_p}}{\left(\frac{u_0}{c_a} + \frac{S_0}{S_p} \right)^2}. \quad (13)$$

В отличие от [8] в (13) учтено, что площадь горла рупора может быть не равна площади сирены. Это обстоятельство учтено в [8] в более громоздких расчетах излучения сирены с учетом сжимаемости газа, что

приводит к появлению в (13) множителя $\frac{\gamma}{2}$. С учетом последнего

замечания КПД сирены $\eta = \frac{P_{ac}}{P_{pn}}$ равен

$$\eta = \gamma \frac{S_m^2}{S_0^2} \frac{\frac{u_0}{c_a} \frac{S_0}{S_p}}{\left(\frac{u_0}{c_a} + \frac{S_0}{S_p} \right)^2}. \quad (14)$$

Максимальное значение КПД будет иметь место, если выполняется условие $\frac{u_0}{c_a} = \frac{S_0}{S_p}$. Это означает, что для значения скорости струи

112 м/с площадь горла рупора S_p должна быть примерно в 3 раза больше средней площади отверстия S_0 . В этом случае величина КПД будет

равен $\eta = \frac{\gamma}{4} \frac{S_m^2}{S_0^2}$. Скорость струи газа 112 м/с, как было сказано выше,

определяется избыточным давлением в резервуаре $\Delta p = 0,075$ атм. Если средний размер отверстия сирены будет равен $S_0 = 34 \text{ см}^2$, то мощность струи равна $P_m = 2866$ Вт, а объемная скорость $S_0 u_0 \approx 0,4$ м/с.

Воздуходувные машины с такими параметрами широко применяются в технике (например, для охлаждения ламп мощных передатчиков). Для увеличения мощности сирены можно принять теперь, что $S_m = S_0$ (как это и делается в [8]). В этом случае КПД сирены составит 35%, а мощность акустического излучения системы сирена-рупор будет равна 1000 Вт. Модулятор представляет собой неподвижный (с кожухом) и вложенный в него вращающийся цилиндры, в каждом из которых вырезаны 6 отверстий, диаметр которых равен 3,8 см. Отверстия периодически открываются и закрываются вращающимся цилиндром. Частота вращения подвижного цилиндра (3,0–3,5 Гц) в 6 раз меньше частоты звука. Согласующий рупор на частоту 20 Гц является достаточно громоздким сооружением. Рассмотрим поэтому другие варианты согласующих устройств.

Резонатор Гельмгольца

Резонатор Гельмгольца, который использовался в установке РАЗ, созданной в НИРФИ в 1982 г. [1]. Резонатор имел размеры примерно 1,5 м х 2 м и добротность около 10. Звуковое давление излучателя в таком резонаторе по сравнению с возбудителем в свободном пространстве увеличивалось в 10 раз, а акустическая мощность — в 100 раз. Было изготовлено 8 излучателей на частоту около 40 Гц. Конструкция возбудителей в разных резонаторах была различной. Большая часть резонаторов возбуждалась системой из 8 низкочастотных динамиков, собранных на единой акустической доске. Из-за малого КПД динамиков акустическая мощность таких резонаторов не превышала 100 Вт.

Приведем теперь оценки размеров резонатора Гельмгольца на частоту 18–20 Гц. Резонатор Гельмгольца представляет собой отрезок цилиндра, нижняя часть которого закрыта, а верхняя имеет отверстие (горло). На дне цилиндра (в его нижней части) устанавливается источник звука. Добротность резонатора не может быть больше 10, что определяется полосой частот 18–20 Гц. В этом случае излучаемая резонатором мощность увеличится в 100 раз.

Резонатор Гельмгольца с частотой 19 Гц и добротностью $Q = 10$ имеет следующие размеры: диаметр резонатора — 2,48 м, высота резонатора — 3 м, диаметр горла — 1,14 м, высота горла — 0,57 м.

Пусть резонатор будет возбуждаться сиреной с производительностью струи $Su = 0,4 \text{ м}^3/\text{с}$. На частоте 19 Гц с учетом КПД 35% и добротности 10 акустическая мощность системы составит около 20 Вт.

Четвертьволновый резонатор

Пусть имеется отрезок трубы с радиусом R и длиной $L \approx \lambda/4$ закрытый с одной стороны. Согласно [9,10], такой резонатор будет иметь добротность $Q = (kR)^{-1}$. Для частоты 18 Гц и добротности 10 размеры резонатора составят: длина (с учетом резонансного удлинения) — около 5 м, диаметр — 57 см. Мощность излучения сирены с четвертьволновым резонатором будет составлять, как и в случае резонатора Гельмгольца, около 20 Вт. Четвертьволновый резонатор выгодно отличается от резонатора Гельмгольца и рупора своей компактностью, однако существенно проигрывает рупору по мощности излучения.

Согласующий экспоненциальный рупор

Согласно [8], сирена хорошо согласуется с экспоненциальным рупором и имеет КПД около 35%. Как указывалось выше, для струи газа, скорость которого равна 112 м/с, объемная скорость $0,4 \text{ м}^2/\text{с}$ и пневматическая мощность около 3000 Вт, мощность излучения системы сирена-рупор будет составлять 1000 Вт, т.е. в 50 раз больше, чем для резонансных систем., поэтому вариант сирена-рупор является предпочтительным.

Теория бесконечного рупора приведена в [11]. Площадь рупора меняется

вдоль оси x по экспоненте $S = S_p e^{\frac{2\Omega_c x}{c_a}}$, где Ω_c — критическая частота рупора, S_p — площадь горла рупора. Для бесконечного рупора его импеданс

$$Z = \rho c_a \left(1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} + j\rho c_a \frac{\omega_c}{\omega}.$$

На частотах $\omega > 2\omega_c$ импеданс рупора становится практически активным и его сопротивление излучения $r = S_p \rho c_a$, а мощность излучения

$P = S_p \rho c_a u_0^2$, где u_0 — осцилляторная скорость газа в горле. Рупор конечных размеров имеет затухающие осцилляции по частоте,

вследствие отражения звука от раскрыва рупора [10,11]. Считается, что рупор хорошо согласован, если его длина и периметр раскрыва больше длины волны звука. Кроме того, как говорилось выше, оптимальное согласование сирены с рупором имеет место при условии $\frac{u_0}{c_a} = \frac{S_0}{S_p}$. Все

это определяет размеры и конфигурацию рупора. Возьмем указанные выше значения $u_0 = 112 \text{ м/с}$, $S_0 = 34 \text{ см}^2$ и критическую частоту рупора $F_c = \frac{F}{2} = 9,5 \text{ Гц}$. Площадь сечения рупора будет определяться

формулой $S = 1,04 \cdot 10^{-2} e^{0,35x}$, где размеры выражены в метрах. Для круглого рупора длиной 22 м, площадь сечения раскрыва составляет $22,8 \text{ м}^2$, а периметр раскрыва (17 м) равен длине акустической волны. Сечение рупора может быть прямоугольным с отношением сторон, например 2:1, а одна из широких сторон может быть плоской и лежать на поверхности земли. Горизонтальное расположение рупора удобно для его изготовления. Такой рупор имеет направленные свойства и максимум его излучения будет на его оси. Для нас важно знать, какая интенсивность звука будет в зенитном направлении. Натурные эксперименты [10] с макетом рупора в масштабе 1:10 показали, что если принять интенсивность звука в зенитном направлении за 1, то интенсивность звука «вперед» вдоль оси равна 1,8, а вдоль оси «назад» 0,6. В первом приближении для расчета интенсивности звука в зенитном направлении можно считать, что диаграмма направленности рупора имеет вид полусферы, как это было принято в разд.2 при расчете энергетики системы РАЗ. В [10] были проведены измерения сопротивления излучения макета рупора. Показано, что экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами расчета.

5. Заключение

Система радиоакустического зондирования атмосферы на основе стенда «Сура» включает в себя радар на частоте 8,9 МГц и акустический излучатель, работающий в диапазоне частот 18–20 Гц.

Акустический излучатель представляет собой систему сирена-рупор. Мощность акустического излучения составляет 1000 Вт. Частота звука перестраивается в пределах 18–20 Гц. Излучатель работает в импульсном режиме: 1–2 с излучение, 10–20 с пауза.

Разработанная авторами акустическая система не имеет аналогов.

Основу радара составляют две секции антенны стенда «Сура». Первая секция является передающей антенной. Оригинальная схема согласования передатчика «Бриг» с антенной существенно (более, чем на 100 дБ) снижает наводку прямого сигнала от передатчика на приемник и дает возможность работы передатчика в непрерывном режиме с мощностью 1000 Вт. Вторая секция играет роль приемной антенны. Прямой сигнал передатчика вместе с сигналом, рассеянным акустическим импульсом, поступает на вход приемника, преобразуется на нулевую частоту и с помощью платы аналог-код записывается в память компьютера. Для выделения сигнала используются программы фурье-анализа. Дальнейшая обработка сигнала с целью определения профилей температуры и вертикальных движений в атмосфере производится по методикам, разработанным авторами (см. [1,2]).

Система радиоакустического зондирования атмосферы на основе стенда «Сура» позволяет проводить исследования динамических процессов в атмосфере (турбулентность, конвективные процессы, внутренние гравитационные волны) в диапазоне частот 0,5–15 км.

Литература

1. Зиничев В.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю., Фабрикант А.Л., Федосеев Ю.Г. Система радиоакустического зондирования тропосферы в КВ радиодиапазон// Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т.34. №3. С. 234–238.
2. Рапопорт В.О., Митяков Н.А., Зиничев В.А., Белова Н.И., Сазонов Ю.А. Исследование малых вариаций параметров тропосферы методом радиоакустического зондирования// Изв.вузов. Радиофизика. 1997. Т.40. №11. С.1355–1364.
3. Рапопорт В.О., Митяков Н.А., Зиничев В.А., Белова Н.И. Роль температурных градиентов и ветров в атмосфере при оценках энергетического потенциала систем радиоакустического зондирования// Изв.вузов. Радиофизика. 1997. Т.40. №5. С.616–625.
4. Lataitis R.J. Signal power radio acoustic sounding of temperature: The effects of horizontal winds, turbulence, and vertical temperature gradients// Radio Sci. 1992. V.27. N3. P.369–385.
5. Karashtin A.N., Shlyugaev Yu.V., Abramov V.I. First HF radar measurements of summer mesopause echos at SURA// Ann. Geophys. 1997. V.15. P.935–939.

6. Звуковые сигналы на судах (учебное пособие) – Горький: ГИИВТ, 1971.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика – М.: Наука, 1983.
8. Римский-Корсаков А.В.. Электроакустика – М.: Связь, 1973.
9. Карнавский М.И. Теория и расчет сирен// ЖЭТФ. 1945. Т.15. Вып.5. С.616–625.
10. Рыжов Н.А. Система радиоакустического зонирования атмосферы на основе станда «Сура»– (Курсовая работа). ННГУ, ВШОПФ, 2001.
11. Фурдуев В.В. Теоретические основы вещания – М.: Связь, 1960.

N.A.Mitjakov, V.O.Rapoport, V.A.Zinichev G.P.Komrakov, U.A.Sazonov,
N.A.Ryzhov

Radio-acoustic atmosphere sounding (RASS) facility on the basis of “Sura” facility

The unique radio-acoustic atmosphere sounding facility (RASS) on the basis of “Sura” heating facility is developed . Radar of the radio-acoustic system operates on frequency 8,9 MHz, and acoustic emitter operates on frequency of 18–20 Hz having power of 1000W. The acoustic emitter consists of a siren and a balancing horn. Original scheme of connecting of a “Brig” transmitter to the antenna allows to provide a continuous mode operation of radar with a power of 1000 W. Scattered signal is determined by Fourier-analysis.

The system of radio-acoustic sounding of atmosphere on the basis of “Sura” facility allows to carry out investigation of dynamics processes in atmosphere (turbulence, convective processes, inner gravity waves) at a height of 0,5–15 km.