

## ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА ПАРОВОДЯНЫХ СКВАЖИН МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (КАМЧАТКА)

© 2005 г. П. П. Фирстов

*Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006*

Поступила в редакцию 12.02.2004 г.

Приведены экспериментальные данные об аэродинамическом шуме, сопровождающем истечение пароводяной смеси в атмосферу из шести скважин Мутновского геотермального месторождения. Результаты обработки данных свидетельствуют о том, что интенсивность и спектральные характеристики турбулентного шума зависят от расхода пароводяной смеси и массового расходного паросодержания. Это позволяет сделать вывод о возможности создания методики для оценки производительности пароводяных скважин на основании акустического метода, которая также может быть применена для мониторинга расхода фумарольных струй в кратерах активных вулканов.

### ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное истечение различных струй в атмосферу сопровождается шумом аэродинамического происхождения, который обусловлен взаимодействием потока струи с окружающей средой. Аэродинамический шум сопровождается фонтанирование искусственных скважин с различным флюидом (газ, пароводяная смесь, нефть и т.д.) на геологических объектах [2], а также естественные природные явления, такие как истечение пепло-газовой смеси при некоторых типах вулканических извержений и извержениях паро-водяной струи гейзеров [5, 11, 12].

В связи с развитием геотермальной энергетики практический интерес представляет определение параметров пароводяных скважин с помощью акустического метода, разработанного для газовых скважин [3]. От газовых пароводяные скважины отличаются тем, что, при истечении паро-водяной смеси (ПВС) в атмосферу, температура и давление претерпевают резкий скачок, происходят фазовые превращения, поэтому в соответствии с изменением продуктивных характеристик скважин необходимо оценивать фазовое состояние флюида. Данная работа выполнена в 1989 г., когда ставился вопрос о строительстве Мутновской ГеоЭС. Выполненный комплекс наблюдений и полученные результаты представляют не только историческое значение. Они являются первым этапом работ по исследованию пароводяных скважин акустическим методом, который, к сожалению, не получил дальнейшего развития за прошедшие полтора десятилетия.

Разработанные методики определения гидродинамических характеристик пароводяных сква-

жин по параметрам аэродинамического шума могут быть полезны для измерения характеристик фумарольных струй на действующих вулканах.

**Краткие сведения о генерации звука турбулентными потоками.** Интерес к шуму, сопровождающему турбулентные потоки, резко возрос в начале 1950-х годов XX в. в связи с применением реактивных двигателей в авиации и запуском ракет. В пионерных работах М.Г. Лайтхилла [8, 9] были разработаны основы теории генерации звука турбулентными потоками. Эти основы в дальнейшем были развиты в [1, 4].

Приведем основные положения теории шума турбулентного потока, в общем виде впервые сформулированные М.Г. Лайтхиллом, а также те упрощающие предположения, которые были использованы при анализе основного уравнения. Уравнение, связывающее гидродинамические параметры потока с аэродинамическими, выводятся из фундаментальных законов сохранения: массы, импульса и энергии.

Уравнение неразрывности в неподвижной системе координат при отсутствии источников массы имеет следующий вид;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность;  $t$  – время;  $u_i$  – скорость движения потока в направлении  $x_i$ .

Уравнение сохранения импульса (количества движения) при отсутствии внешних сил

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j + P_{ij}) = 0, \quad (2)$$

где  $\rho u_i u_j$  – тензор касательных напряжений Рейнольдса;  $P_{ij} = p\delta_{ij} + \eta \left[ -\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2\partial u_k}{3\partial x_k} \delta_{ij} \right]$  – тензор напряжений от сил давления  $p$  и вязкости;  $\eta$  – коэффициент сдвиговой вязкости;  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j \\ 0 & \text{при } i \neq j \end{cases}$  – символ Кронекера.

Дифференцируя уравнение неразрывности (1) по времени, а уравнение количества движения (2) – по пространственной координате  $x_i$  и вычитая один результат из другого, получаем

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (\rho u_i u_j + P_{ij}). \quad (3)$$

Вычитая затем из обеих частей этого уравнения величину  $c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i \partial x_j} \delta_{ij}$ , получаем основное уравнение движения потока, без каких-либо допущений:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (4)$$

где  $c_0$  – скорость распространения звука в невозмущенной среде, тензор  $T_{ij} = \rho u_i u_j + (P_{ij} - p\delta_{ij}) + (p - c_0^2 \rho) \delta_{ij}$  представляет собой разность напряжений в потоке и напряжений в покоящейся среде. Первый член отражает перенос количества движения  $\rho u_i$  со скоростью  $u_j$ , второй – вязкое напряжение, третий – теплопроводность.

Левая часть уравнения (4) описывает распространение звука в покоящейся среде, а правая часть характеризует источники звука, образующиеся вследствие действия поля напряжений в жидкости.

Решение уравнения (4) рассматривается при условии пренебрежения в  $T_{ij}$  вторым и третьим членами по сравнению с первым членом. С физической точки зрения это означает пренебрежение эффектом поглощения звука из-за вязкости и теплопроводности. Кроме того, плотность среды в потоке считается постоянной и равной плотности окружающей среды  $\rho \approx \rho_0$ . При таких упрощениях, допустимых только в случае дозвукового изотермического потока, может быть получено решение этого уравнения для плотности или давления вне поля турбулентного потока, если предположить, что тензор  $T_{ij} \approx \rho u_i u_j$  известен.

Для неизоэнтальпического потока, даже если принять, что величина  $P_{ij}$  может быть приближенно заменена  $p\delta_{ij}$ , анализ  $T_{ij}$  также не может быть проведен на основе введенных приближений, поскольку помимо учета изменения средней плотности среды при рассмотрении процессов излучения и распространения звука необходимо учитывать из-

менение скорости звука в зоне смешения струи. Даже предполагая, что давление и плотность являются изоэнтальпическими функциями, при использовании соотношения  $dp = c^2 d\rho$ , где  $c$  – местная скорость звука, для исключения члена  $P_{ij} - c^2 \rho \delta_{ij}$  необходимо в различных частях струи использовать различную величину  $c$ .

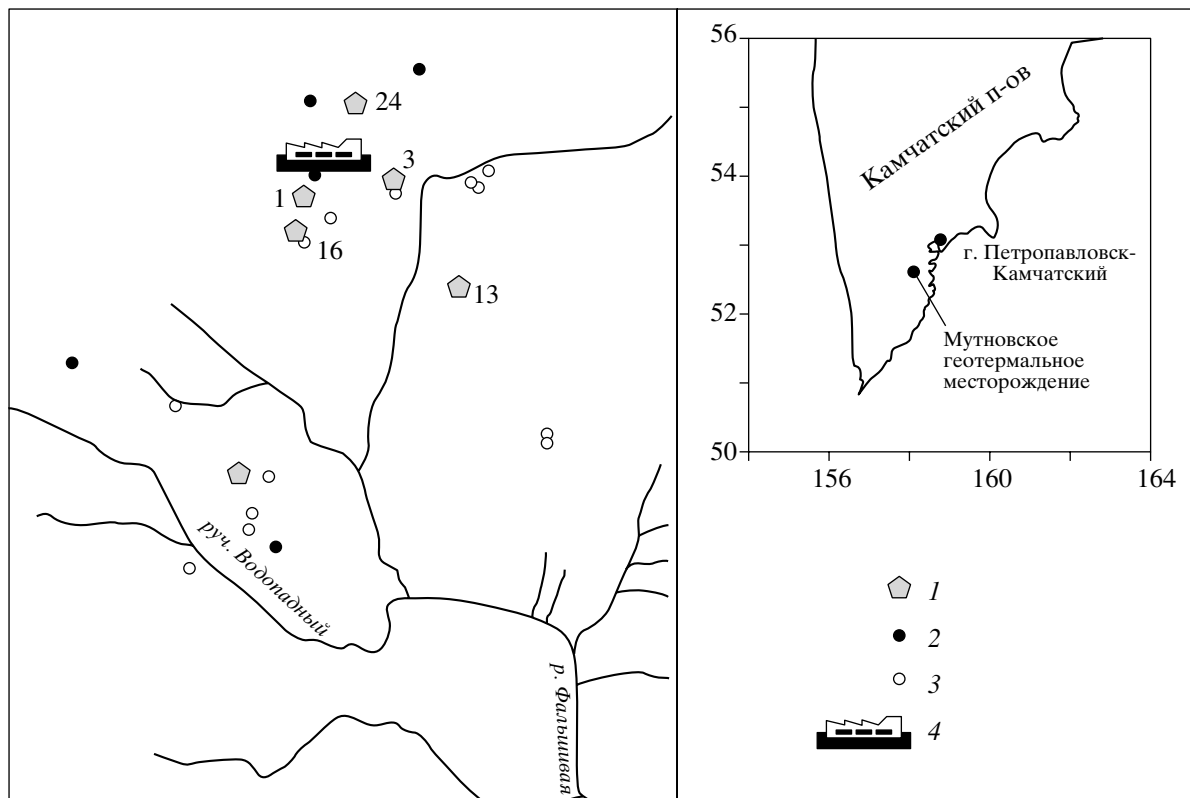
Основанные на теории Лайтхилла результаты оценки шума неизотермических струй, а также струй с переменной плотностью не всегда подтверждаются экспериментальными данными, а регистрация аэродинамического шума пароводяных струй представляет большой интерес для проверки этой теории.

**Методика наблюдений и аппаратура.** Изучение аэродинамического шума ПВС проводилось на Мутновском месторождении в мае и октябре 1989 г. Аэродинамический шум регистрировался на шести скважинах № 1, 3, 4, 13, 16, 24 (рис. 1). Расход ПВС ( $Q_{\text{ПВС}}$ ) и пара ( $Q_{\text{ПАР}}$ ) определялся по графикам зависимости расхода от давления на устье скважины  $Q = f(P)$ , которые являются основными характеристиками пароводяных скважин. По данным Камчатской гидрогеологической экспедиции “Сахалингеология”\* оценки основных параметров скважин проводились разными методами в течение нескольких лет. Разброс основных параметров составлял не более 10%. Нами брались расходные параметры (табл. 1) по усредненным графикам  $Q = f(P)$ .

Акустические измерения проводились с помощью измерителя шума и вибраций (ИШВ-1) и импульсного измерителя звукового давления (RTF-00017) с параллельной записью сигнала на измерительный магнитофон (“Брюль и Кьер”), модель 7005). Магнитофон имел равномерную амплитудно-частотную характеристику в диапазоне 0–1.25 кГц при скорости записи 381 мм/с. Шумометры, калибровка которых осуществлялась с помощью пистифона (RFT-00003), позволяли измерять уровень звукового давления и производить спектральный анализ в октавных полосах частот непосредственно на месте. Октавный анализ, естественно, содержит лишь укрупненные детали.

Величина уровня звукового давления измерялась в дБ по формуле  $L = 20 \lg \left( \frac{\tilde{p}}{p_0} \right)$ , где:  $\tilde{p}$  – эффективное значение звукового давления;  $p_0 = 2 \times 10^5$  Па – пороговая величина звукового давления. Величи-

\* Отчет. О результатах предварительной разведки на участке Дачном Мутновского месторождения парогидротерм и подсчет запасов теплоносителя для обоснования проекта строительства первой очереди геотермальной электростанции 50 МВт // Петропавловск-Камчатский. 1986. Фонды Камчатской гидрогеологической экспедиции Сахалингеологии



**Рис. 1.** Схема расположения скважин: 1 – скважины, на которых проводились работы; 2 – эксплуатационные скважины; 3 – разведочные скважины; 4 – Мутновская ГеоЭС. На врезке показано расположение Мутновского геотермального месторождения.

на эффективного звукового давления вычислялась как  $\tilde{p}_0 = 10^{\frac{L-94}{20}}$  Па.

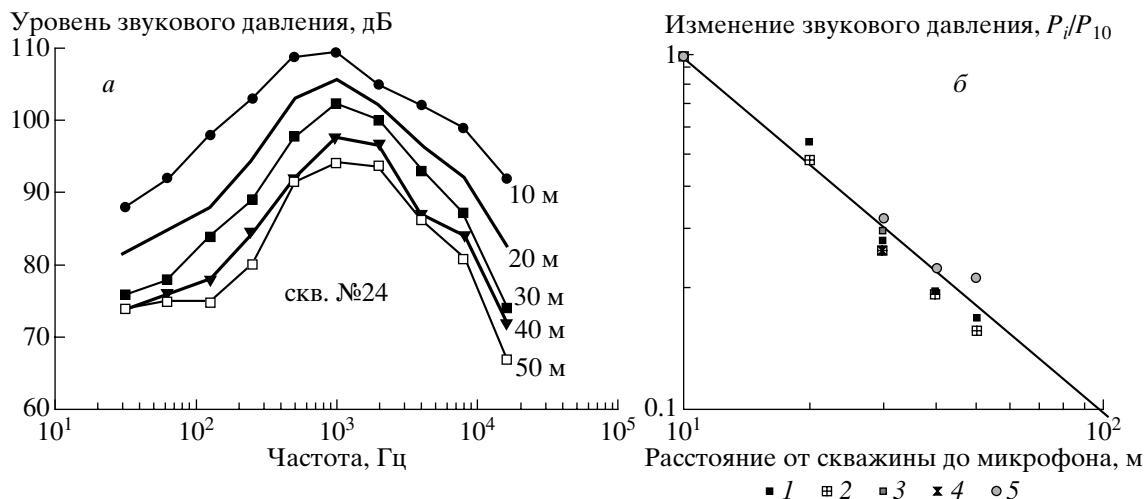
Магнитофонная запись позволила получить изменение спектров для скв. 1 и 13 для различ-

ных режимов в лабораторных условиях с помощью спектроанализатора (“Брюль и Кьер”, модель 2034) и осуществить наблюдение изменения уровня шума в процессе открытия скв. 1 на самописце уровня.

**Таблица 1.** Основные параметры скважин и характеристики их аэродинамического шума

№ скважины	Температура, °С	Теплосодержание, ккал/кг	Расход, кг/с		$x = \frac{Q_{\text{пара}}}{Q_{\text{ПВС}}}$	$P$ , кгс/см <sup>2</sup>	Характеристики аэродинамического шума			
			ПВС	Пара			$L_{10}$ , дБ	$f_{\text{СР}}$ , кГц	$f_{\text{Н}} - f_{\text{В}}$ , кГц	$\Delta f_{0.7}$ , кГц
1	165	268	23	4.3	0.19	4.2	108	0.7	0.32–1.7	1.38
3	138	253	9.2	1.5	0.16	3.5	96	1.0	0.5–2.0	1.5
4	158		25	6.0	0.24	5.5	108	1.7	0.7–3.2	2.5
13	181	296	45	11.8	0.26	10.4	123	0.6	0.1–3.0	2.9
			40	10.3	0.25	12.0	120	1.0	0.4–2.4	2.0
			25	5.8	0.23	16.0	116	1.0	0.4–2.4	2.0
			7	3.2	0.45	17.6	114	1.4	0.5–4.0	3.5
16	172	488	29.4	18.9	0.64	7.4	117	3.0	1–10	9
24	167	253	28	4.5	0.16	7.7	109	0.9	0.25–1.7	1.45

Примечание.  $x$  – массовое расходное паросодержание;  $P$  – давление на устье скважины;  $L_{10}$  – максимальное значение уровня звукового давления на расстоянии 10 м, полученное с помощью октавных фильтров;  $f_{\text{Н}} - f_{\text{В}}$  – значения верхней и нижней частоты;  $f_{\text{СР}}$  – среднегеометрическая частота;  $\Delta f_{0.7}$  – ширина полосы для уровня 0.7 октавного спектра.



**Рис. 2.** Октавные спектры уровня звукового давления аэродинамического шума на расстояниях 10–50 м для скв. № 24 (а), сводный график изменения уровня звукового давления шума с расстоянием для всех скважин (б): 1 – скв. 24; 2 – скв. 4; 3 – скв. 16; 4 – скв. 3; 5 – скв. 1.

Микрофоны двух приборов устанавливались на высоте устья скважины поочередно, с шагом 10 м на расстоянии от 10 м до 50 м от ствола скважины. Синхронная запись одновременно двумя приборами показала хорошую сходимость результатов.

Для скв. № 1, 3, 4, 16, 24 исследовался шум при полностью открытой задвижке. На оголовках этих скважин был установлен лубрикатор диаметром 106 мм и длиной 160 см. На оголовке скважины 13 лубрикатор отсутствовал; эксперимент на ней проводился на нескольких режимах, изменяемых с помощью задвижки. Обильное выпадение конденсированной воды и высокий уровень звукового давления позволили проводить на этой скважине измерения на расстоянии не ближе 20 м. Измерения проводились при четырех фиксированных положениях задвижки. Для скв. № 1 исследовалась динамика шума и изменение его спек-

трального состава во время постепенного открытия задвижки.

**Спектральные характеристики аэродинамического шума от пароводяных скважин.** Анализ аэродинамического шума скв. №№ 1, 3, 16, 24 в зависимости от расстояния показал, что с расстоянием октавные спектры шума мало изменяют форму, а звуковое давление уменьшается, согласно теоретической зависимости  $\tilde{p} \sim 1/r$ . В качестве примера на рис. 2, а приведены октавные спектры уровня звукового давления ( $L$ ) для скв. № 24 на расстояниях от 10 м до 50 м, а на рис. 2, б показан обобщенный график относительного изменения эффективного звукового давления  $\tilde{p}$  от расстояния для наблюдений на всех скважинах.

В табл. 2 приведены зарегистрированные октавными фильтрами шумомера значения уровней звукового давления  $L_{10}$  аэродинамического шума для всех скважин с лубрикатором, приведенных к

**Таблица 2.** Уровень звукового давления (дБ), зарегистрированной октавными фильтрами, на расстоянии 10 м от устья пароводяной скважины при полностью открытой задвижке

№ скв.	Средняя частота полуоктавных фильтров, Гц									
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
1	78	89.5	95.3	105	108	108.5	105.5	103.5	102	94.5
3	76	78	82	87	93	96	94	88	83	74
4	85	88	92	98.5	104	106.5	108.5	104	100	87
13	104	114	121	122	123	123	122	118	112	106
16	80	84	89	106	111	115	117.5	117.5	116.5	111.5
24	88	92	98	103	109	109.5	105	102	99	92

Примечание. Регистрация шума на скв. 13 осуществлялась на расстоянии 20 м, данные приведены к расстоянию 10 м ( $L_{10} = L_{20} + 6$  дБ).

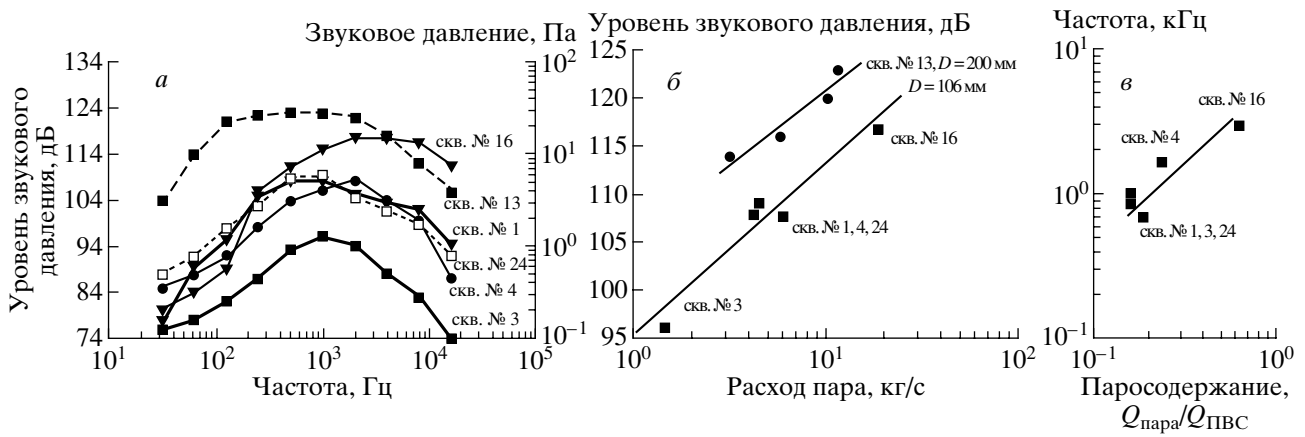


Рис. 3. Октавные спектры уровня звукового давления аэродинамического шума для всех исследуемых скважин, приведенных к расстоянию 10 м (а), зависимость уровня звукового давления от расхода пара (б), зависимость максимальной частоты от паросодержания в ПВС (в).

расстоянию 10 м, а на рис. 3, а показаны сами спектры. Октавные спектры аэродинамического шума на расстоянии 20 м для четырех режимов скв. № 13 показаны на рис. 4, а. В табл. 1 приведены: максимальное значение уровня звукового давления на расстоянии 10 м ( $L_{10}$ ), полученное с помощью октавных фильтров; значения верхней и нижней частоты ( $f_n - f_b$ ); среднегеометрическая часть ( $f_{cp}$ ); ширина полосы ( $\Delta f_{0.7}$ ) для уровня 0.7 октавного спектра. Видно, что октавные спектры  $L_{10}$  аэродинамического шума для всех скважин значительно различаются по абсолютному значению, преобладающим частотам и ширине полосы. Рассматривалась зависимость  $L_{10} = f(Q_{пар})$  для всех скважин с лубрикаторм и для четырех режимов скв. 13. На рис. 3, б видно, что поле точек образует две группы для различных диаметров выходного отверстия. Методом наименьших квадратов получены следующие зависимости:

$$L_{10}(\text{дБ}) = 18.46 \lg Q_{\text{пар}} (\text{кг/с}) + 94.61 \text{ для скважин с лубрикаторм};$$

$$L_{10}(\text{дБ}) = 14.88 \lg Q_{\text{пар}} (\text{кг/с}) + 105.78 \text{ для } 4^x \text{ режимов скв. 13.}$$

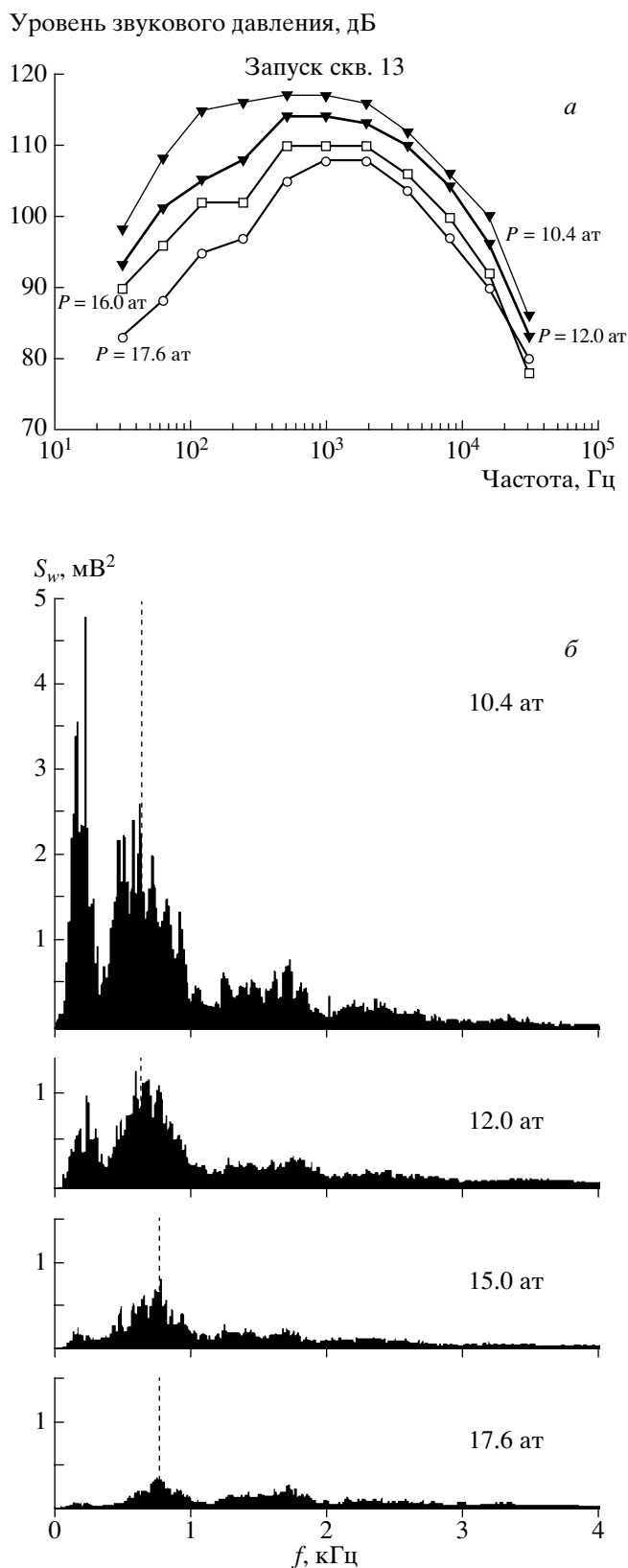
На рис. 3, в билогарифмическом масштабе приведена зависимость среднегеометрической частоты от массового расхода паросодержания  $f_{cp} = f(x)$ . На графике хорошо видна тенденция увеличения  $f_{cp}$  при увеличении паросодержания.

Для скв. № 13, в процессе ее запуска, строились как октавные спектры  $L$ , так и детальные спектры мощности сигнала для четырех фиксированных давлений на устье скважины: 17.6; 16.0; 12.0; 10.4 атм. На рис. 4, а приведены октавные спек-

тры  $L$  для сигнала, зарегистрированного на расстоянии 20 от устья скважины. Шум, записанный с помощью измерительного магнитофона со скоростью 381 мм/с, анализировался на спектроанализаторе с высокой разрешающей способностью в диапазоне частот 0–6.4 кГц с шагом  $\Delta f = 8$  Гц. На рис. 4, б приведены спектры мощности, которые позволили выявить тонкую структуру спектров аэродинамического шума. При небольшом открытии задвижки  $P_1 = 17.6$  атм и высоком паросодержании  $x = 0.45$  максимум мощности сигнала составляет  $0.25 \text{ мВ}^2$  и приходится на частоту  $f_1 = 750$  Гц. Уровень мощности сигнала в диапазоне частот 0–600 Гц очень мал. При дальнейшем открытии задвижки  $P_2 = 16.0$  атм и  $P_3 = 12.0$  атм первый максимум несколько сдвигается в сторону низких частот (600 Гц) и формируется второй максимум на частоте около 200 Гц. При полностью открытой задвижке ( $P_4 = 10.4$  атм) спектр имеет два четко выраженных спектральных максимума на этих частотах с амплитудой  $2.5 \text{ мВ}^2$  и  $4.8 \text{ мВ}^2$ .

В процессе запуска скв. № 1 аэродинамический шум непрерывно записывался на магнитофон со скоростью 38.1 мм/с. Задвижка скважины равномерно открывалась в течение 8 мин, что позволило проследить динамику аэродинамического шума, генерируемого ПВС при медленном увеличении расхода и изменении паросодержания. На рис. 5, а приведены кривые среднеквадратического значения  $L$  аэродинамического шума на расстояниях 10 и 20 м, полученные с помощью самописца уровня.

На спектроанализаторе последовательно анализировались участки записи длительностью около одной минуты, спектры мощности которых приведены на рис. 5, б. По мере открытия скважины и изменения дебита ПВС наблюдались возрастание уровня шума и трансформация спек-



**Рис. 4.** Октавные спектры (а) и спектры мощности (б)  $L_p$  аэродинамического шума, зарегистрированного на расстоянии 20 м, для четырех режимов скв. № 13.

ров. После первой минуты открытия задвижки спектр шума имеет ряд спектральных пиков с максимумом на частоте  $f_1 = 0.26 \text{ кГц}$  и амплитудой  $0.5 \text{ мВ}^2$ . В процессе открытия задвижки с увеличением дебита ПВС резко увеличивается амплитуда спектральных пиков и происходит “перекачка” энергии из меньшей дискретной частоты в более высокие:  $f_2 = 0.43 \text{ кГц}$  – после второй минуты;  $f_3 = 0.64 \text{ кГц}$  – после третьей минуты;  $f_4 = 0.8 \text{ кГц}$  – после четвертой минуты. До 8-ой минуты наблюдается стабилизация спектра как по частоте, так и по амплитуде около  $6.0 \text{ мВ}^2$ . В дальнейшем спектр несколько расплывается, четко выраженный спектральный пик на частоте  $f_4 = 0.8 \text{ кГц}$  имеет амплитуду  $2 \text{ мВ}^2$  и спектральный пик на частоте  $f_1 = 0.26 \text{ кГц}$  имеет амплитуду  $\sim 1.0 \text{ мВ}^2$ .

Изменение спектрального состава иллюстрирует рис. 5, в, где показаны кривые частот, на которые приходится 0.5 и 0.75 интегральной мощности уровня звукового давления, вычисленные по спектрам в течение всего периода открытия скважины.

**О связи гидродинамических и акустических характеристик струи пароводяной смеси.** Исследования генерации шума при выпусках ПВС в атмосферу из скважин Мутновского геотермального месторождения показали, что уровень звукового давления и спектральные характеристики шума связаны с гидродинамическими параметрами ПВС. Как видно из рис. 3, б и 3, в, в первом приближении наблюдаются линейные зависимости уровня звукового давления от логарифма расхода ПВС  $L = f(\lg Q_{\text{ПВС}})$  и логарифма среднегеометрической частоты по уровню 0.7 полуоктавных спектров от логарифма массового расходного паросодержания  $\lg f_{\text{ср}} = f(\lg x)$ .

Рассмотрим на качественном уровне особенности спектрального состава аэродинамического шума, возникающего при истечении ПВС из скважин с различными гидродинамическими параметрами. В зависимости от массового расходного паросодержания поток на среде сопла может быть однофазным и двухфазным. В [10] выявлены характерные особенности, присущие шуму однофазных и двухфазных потоков. Для однофазных потоков как газа, так и воды характерен максимум спектра в области частот 1000–2000 Гц, а для двухфазного потока – на частотах – 200–500 Гц. Эти особенности спектрального состава шума истечения ПВС хорошо иллюстрируются изменениями октавных спектров и спектров мощности при запуске скв. № 13 на рис. 4. При  $Q_{\text{ПВС}} = 7 \text{ кг/с}$  и  $x = 0.45$  на спектрах мощности выделяется максимум на частоте 0.8 кГц. При полностью открытой задвижке расход ПВС возрастает до  $Q_{\text{ПВС}} = 45 \text{ кг/с}$ , а массовое расходное паросодержание падает до  $x = 0.25$ . Формируются два спектральных максимума на частотах 200 и 600 Гц. Первый максимум, по-видимому, обусловлен истечением двухфазной

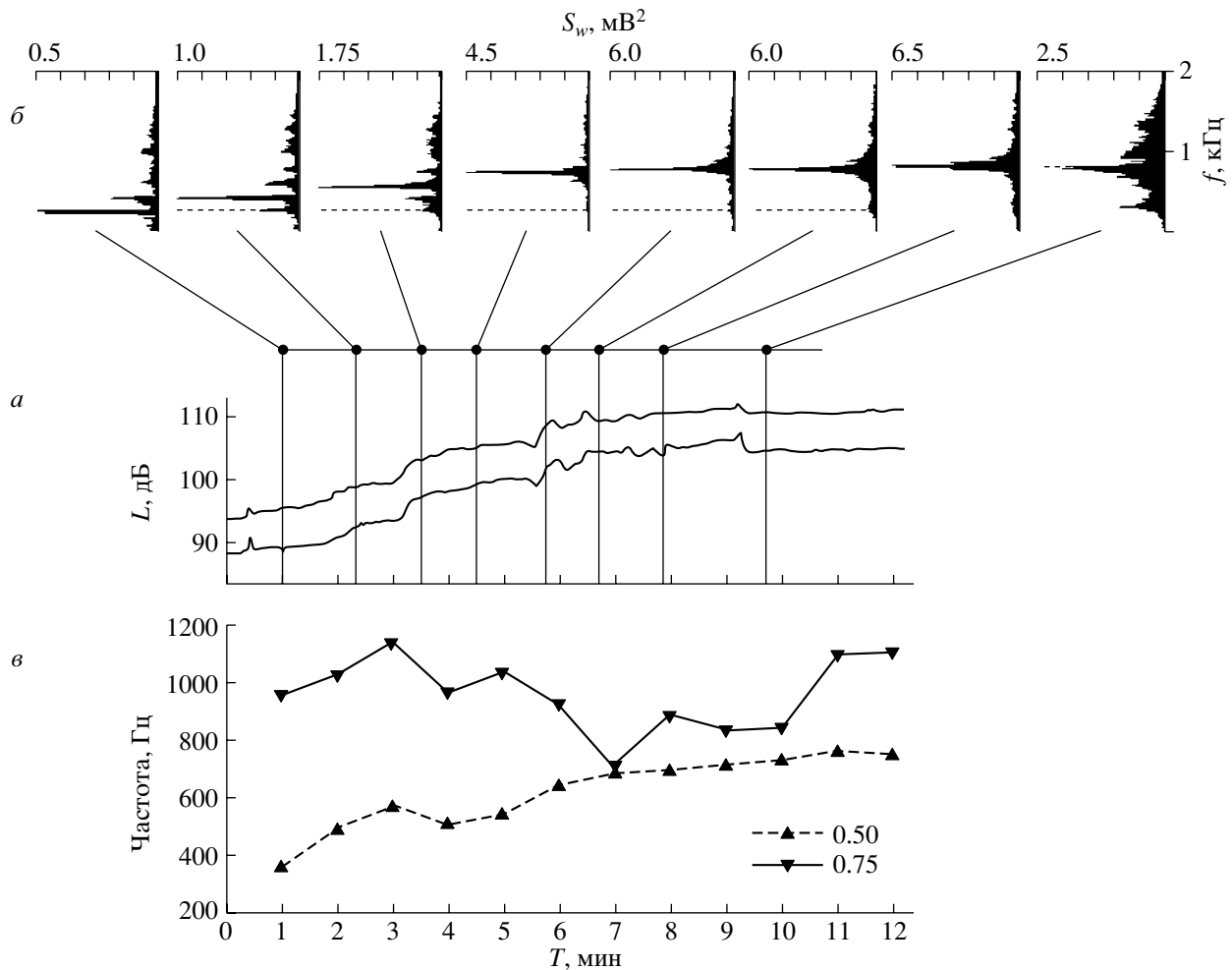


Рис. 5. Динамика изменения уровня звукового давления аэродинамического шума при запуске скв. № 1 (а); эволюция спектров мощности (б) и динамики частот (в), на которые приходится 0.5 и 0.75 интегральной мощности шума, в процессе увеличения расхода ПВС.

смеси пар-вода, а второй – истечением пара. Большой расход и большой диаметр скважины (200 мм) приводит к формированию широкополосного октавного спектра уровня звукового давления  $(f_n - f_b)_{0.7} = 0.1 - 3.0$  кГц с  $f_{cp} = 0.6$  кГц.

Октавный спектр скв. № 16 с высоким  $\chi = 0.64$  более высокочастотный  $(f_n - f_b)_{0.7} = 1 - 10.0$  кГц. В этом случае из-за большой скорости потока и высокого теплосодержания (488 ккал/с) ПВС не конденсируется в зоне генерации аэродинамического шума, которая составляет несколько диаметров лубрикатора [6], и спектр шума близок к спектру однофазного потока.

Максимум уровня звукового давления октавных спектров аэродинамического шума при истечении ПВС определяется диаметром сопла и расходом пара (рис. 3, б).

Для пояснения изменения спектрального максимума при запусках скв. № 1 и 13 рассмотрим механизм возникновения звука в струях. Турбулентные

струи являются достаточно мощными источниками шума с широким спектром частот. При турбулентном истечении ПВС из лубрикатора скважины ее можно отнести к струям с коротким питающим каналом. Внутри струи имеются завихрения, направленные к оси, что обусловлено наличием разрежения в струе и подтеканием частиц из окружающей среды. Часть упругой энергии газа тратится на увеличение размеров и энергии вихрей. На ламинарном участке имеются гармонические пульсации скорости, при этом их собственная частота определяется числом Струхала  $Sh = f_0 d / u_0$ , где  $d$  – диаметр,  $u_0$  – скорость в центре струи. Значение  $Sh$  для плоской струи равно 0.14, для круглой – 0.18. С увеличением диаметра вихря растет скорость частиц газа на его границах. Это приводит к разрушению вихря и образованию “пятна” турбулентности с появлением случайных пульсаций скорости, характерных для турбулентного режима. С ростом скорости истечения увеличиваются размеры и число “пятен”, “которые охватывают

всю струю, распространяясь от критического слоя к периферии и центру. Описанный механизм определяет переходную зону от ламинарного течения к турбулентному.

В ламинарной струе имеют место и симметричные пульсации, максимум амплитуд которых приходится на ось струи, причем частота пульсации определяется значением  $Sh = 0.24$  при числе Рейнольдса

$Re > 400$ . Для струи  $Re = \frac{\bar{u}d}{\nu}$ , где  $\bar{u}$  – средняя скорость истечения,  $d$  – диаметр струи,  $\nu$  – вязкость газа. Число Струхала для этого случая определя-

ется как  $Sh = \frac{\bar{u}d^2 f}{u_0 Re \nu}$ .

При дальнейшем увеличении скорости струи она теряет устойчивость, ее ось искривляется, при этом формируется вихревая дорожка. Случайные возмущения, сдвигающие струю в направлении, перпендикулярном оси, вызывают упругую реакцию среды, возвращающей ее в обратном направлении. Этот процесс создает дипольный источник звука, который, в свою очередь, воздействует на струю и поддерживает поперечные колебания без влияния внешних возмущений.

Таким образом, при достаточно больших числах Рейнольдса  $Re > 400$  в качестве оценки максимальной частоты спектра можно использовать выражение для числа Струхала, откуда частота:

$$f = \frac{Sh u_0 Re \nu}{\bar{u} d^2}, \quad \text{или} \quad f = \frac{Sh u_0}{d}. \quad (5)$$

Формула (5) указывает, что частота максимума спектра растет с ростом скорости  $u_0$ , что наглядно демонстрируется рис. 5, а. Также хорошо прослеживается переход спектра с дискретными частотами к широкополосному шуму (рис. 5). Снижение роста звукового давления указывает на принципиально разный характер преобладающих источников в струе при развитой турбулентности с числом Рейнольдса больше 400 и меньше этого критического значения.

**Заключение.** 1. В работе приведены экспериментальные данные измерений аэродинамического шума, сопровождающего истечения пароводяной смеси в атмосферу из некоторых скважин Мутновского геотермального месторождения.

2. Результаты обработки данных свидетельствуют о том, что интенсивность и спектральные характеристики турбулентного шума связаны с расходом пароводяной смеси и массовым расходом паросодержанием. Это позволяет сделать вывод о возможности создания методики для оценки производительности пароводяных скважин на основании акустического метода. Предпо-

лагается, что эта методика также может быть применена для мониторинга расхода фумарольных струй в кратерах активных вулканов.

Автор выражает благодарность К.Л. Грдзеловой за консультации и помощь в выполнении как полевых исследований, так и работ на спектроанализаторе, а также Ю.А. Филиппову за помощь в проведении полевых работ на Мутновском геотермальном месторождении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голдстейн М.Е.* Аэроакустика. М.: Машиностроение, 1981. 287.
2. *Коротаев Ю.П., Грдзелова К.Л., Гергедова Ш.К., Участкин Ю.В.* Акустический способ исследования скважин // Газ. пром. Сер.: Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. 1983. № 11. С. 18–22.
3. *Коротаев Ю.П., Грдзелова К.Л.* Исследование газовых скважин с помощью шумометрии // Газ. пром. Сер.: Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. 1983. № 2. 49 с.
4. *Муниин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.Л.* Аэродинамические источники шума. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.
5. *Руленко О.П., Ким К.П.* Измерение акустического шума и высоты выбросов воды при извержении гейзеров Великан, Большой и Малый // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 88–92.
6. *Штюбер Б., Хекл М.* Шум потокосоздающих и токопроводящих машин и устройств // Справочник по технической акустике. Л.: Судостроение, 1980. С. 183–213.
7. *Шулюпин А.Н.* Научно-методические основы определения параметров пароводяных течений для рационального освоения геотермальных месторождений: Автореф. дис. ... д-ра технич. наук. Хабаровск, 2003. 42 с.
8. *Lighthill M.G.* On sound generated aerodynamically. Part I. General theory // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1952. V. 211. P. 564–587.
9. *Lighthill M.G.* On sound generated aerodynamically. Part II. Turbulence as a sources of sound // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1954. V. 222. P. 1–32.
10. *Mckinly R.M., Bower E.M., Rumble R.C.* The structure and interpretation of noise from flow behind cemented casing // J.P.T. 1973. March. P. 329–338.
11. *Richards A.F.* Volcanic sounds, investigation and analysis // J.G.R. 1963. V. 35. P. 614–616.
12. *Woulff G., McGetchin T.* Acoustic Noise from Volcanoes: Theory and Experiment // Geophys. J. R. astr. Soc. 1976. № 45. P. 601–616.



## **Spectral Content of the Aerodynamic Noise at Steam-and-water Wells in the Mutnovskii Geothermal Field. Kamchatka**

**P. P. Firstov**

*Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

Experimental evidence is presented relating to the aerodynamic noise that accompanies the emission of steam-and-water mixture into the air from six wells in the Mutnovskii geothermal field. Results from data processing show that the intensity and spectral characteristics of the turbulent noise are controlled by steam-and-water mixture discharge and mass steam discharge content. This suggests that a technique could be developed to assess the production of steam-and-water wells using the acoustic method: the technique can also be used to monitor the discharge of fumarole jets in craters of active volcanoes.