

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ И В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ СТРУИ

Курзин В.Б. – ИГиЛ СО РАН

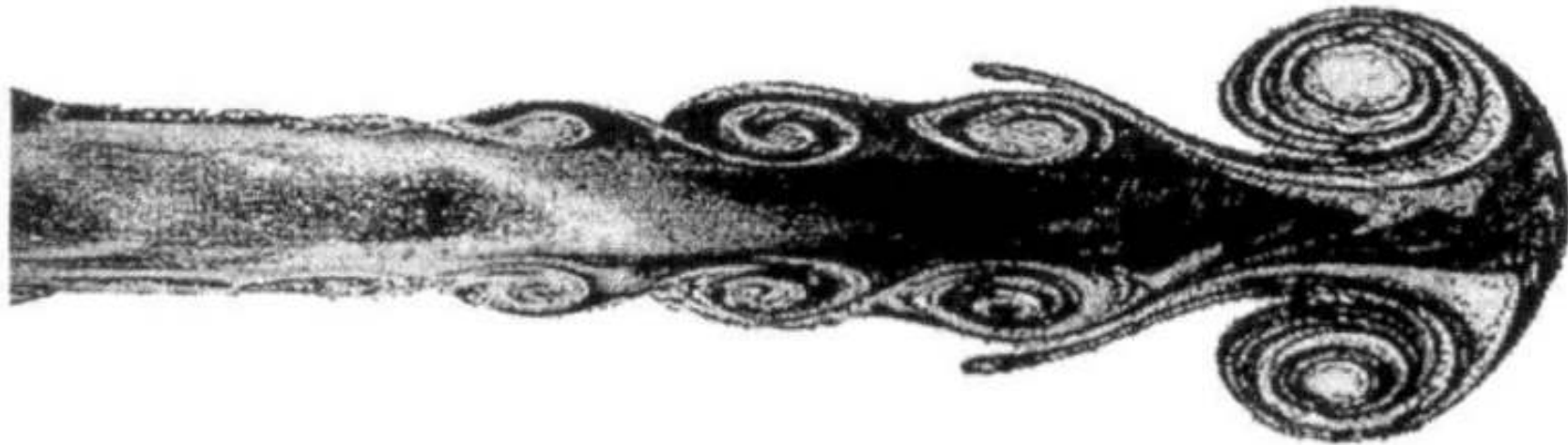
АННОТАЦИЯ

Построена математическая модель акустических автоколебаний в ограниченных областях, возникновение которых связано с неустойчивостью собственных акустических колебаний в этих областях за счет энергии протекающего или истекающего из них основного потока жидкости. В качестве обратной связи собственных акустических колебаний с потоком установлено ее взаимодействие с колебаниями, индуцируемыми нестационарной составляющей вихревой пелены, сбегаящей при истечении газа, колеблющегося в рассматриваемой области. Сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными для областей достаточно простой геометрии показало удовлетворительное их соответствие.

В рамках данной модели путем применения современной вычислительной технологии могут быть определены условия возникновения акустических автоколебаний в областях более сложной геометрии, к числу которых относятся проточные части двигателей и различных ее элементов в виде открытых подобластей, а также камеры сгорания при истечении газа через сопло.

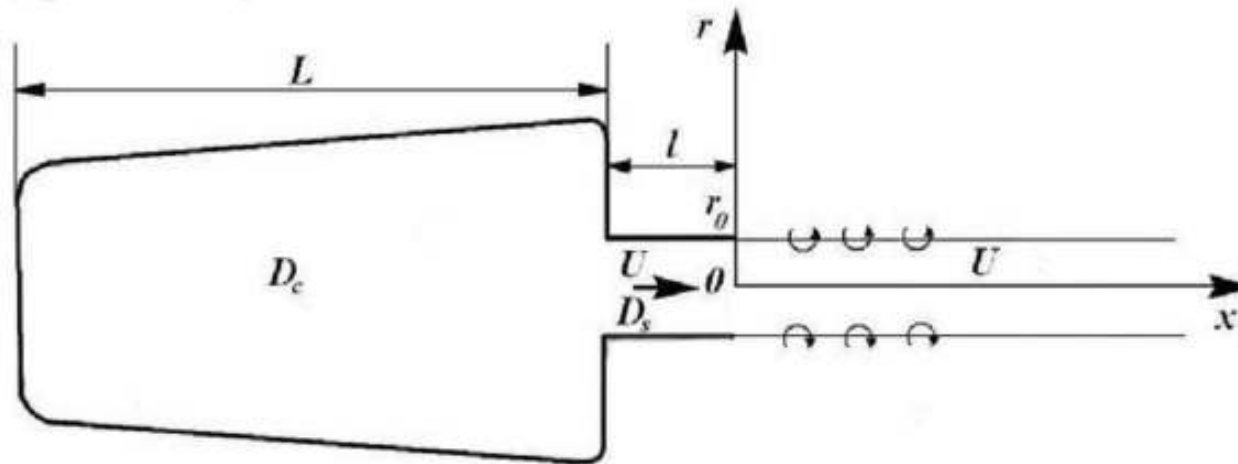
К числу автоколебательных явлений, механизм возникновения которых частично связан с указанным выше теоретическим результатом, относится и помпаж.

Физические предпосылки



При формировании вихревых колец посредством истечения струи из трубы в течении некоторого заданного промежутка времени в ряде случаев возникали вторичные вихревые кольца. При этом соответствующий процесс сопровождался интенсивными акустическими колебаниями в камере с частотой схода этих колец. Возникло предположение, что между акустическими колебаниями и вторичными вихревыми кольцами имеет место положительная обратная связь. Иными словами, возникающие при любом внешнем возмущении собственные акустические колебания в камере за счет энергии потока при истечении струи образуют нестационарную составляющую вихревой пелены, сворачивающиеся в вихревые кольца. Эти вихревые кольца индуцируют движение газа, соответствующая которому нестационарная составляющая давления может способствовать увеличению интенсивности порождающих их акустических колебаний и таким образом способствовать возникновению их автоколебаний.

Математическая модель движения газа в камере, индуцированного нестационарной составляющей вихревой пелены



$$\gamma(0, t_0) = \frac{d\Gamma}{dx} = 2u_0 \exp(i\omega t_0), \quad \gamma(x, t) = \frac{d\Gamma}{dx} = 2u_0 \exp\left[i\omega\left(t - \frac{2x}{U_0}\right)\right]$$

$$u_{\gamma x} = u_0 \exp(-i\mu_0 x)(\alpha_0 + \alpha_x), \quad u_{\gamma r} = -\left[\frac{ikr}{M} u_{\gamma x} - \frac{u_0 r}{2r_0(1+x_1^2)^{3/2}}\right],$$

$$\alpha_0 = \int_0^{\infty} \frac{\exp(-i\mu\eta)d\eta}{(1+\eta^2)^{3/2}}, \quad \alpha_x = r_0^2 \int_0^x \frac{\exp(-i\mu_0 x_0)dx_0}{[r_0^2 + (x_0 + x)^2]^{3/2}}, \quad \mu_0 = \frac{2\omega}{U},$$

Постановка задачи

Для описания акустических колебаний введем потенциала скорости φ_a , который определяется соотношением

$$\mathbf{u}_a = \nabla \varphi_a, \quad \varphi_a = \varphi \exp(i\lambda t), \quad (\lambda = \omega + i\delta)$$

где ω - частота акустических колебаний, δ - параметр, характеризующий устойчивость течения по отношению к малым его возмущениям. В предположении о том, что камера является цилиндрической областью, амплитудная функция потенциала скорости должна удовлетворять уравнению

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} - \left(ik + M \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \varphi = 0, \quad M = \frac{U}{a}$$

при следующих краевых условиях

- 1) $\frac{\partial \varphi(r)}{\partial \nu} + u_{rv}(r) = 0, \quad r \in S_1, \quad S_1$ - жесткая поверхность камеры,
- 2) $u^{(1)} = u^{(2)}, \quad p^{(1)} = p^{(2)}, \quad r \in S_2, \quad S_2$ - сечение на выходе из сопла,
- 3) $[u_v^{(2)}] = 0, \quad [p^{(2)}] = 0, \quad r \in S, \quad S$ - поверхность вихревого слоя,
- 4) $\varphi^{(2)} = 0, \quad x \rightarrow -\infty$
- 5) *излучения и Жуковского,*

Здесь индексы (1),(2) обозначают внутреннюю и внешнюю подобласти, $p^{(j)}$ - акустическое давление.

Решение поставленной однородной краевой задачи определяется с точностью до произвольной константы, в качестве которой задается значение амплитуды акустических колебаний на выходе из сопла u_0 . Условием существования этого решения является равенство нулю определителя матрицы коэффициентов аппроксимации искомого решения. Корнями соответствующего трансцендентного алгебраического уравнения являются значения параметра λ в зависимости от геометрических параметров камеры и параметров потока.

Промежуточные соотношения в решении поставленной задачи, приближенно определяющие условия возникновения акустических автоколебаний

Известно, что при $M = 0$ имеет место равенство $p_0 = z_0 u_0$, ($x = 0$), где акустический импеданс

$$z_0 = \rho_0 a \chi_0, \quad \chi_0 = \chi_{01} + i\chi_{02}, \quad \chi_{01} = \frac{k_0^2}{4}, \quad \chi_{02} = \frac{2k_0}{\pi}, \quad k_0 = kr_0, \quad k = \frac{\omega}{a}$$

Показано, что при $M \neq 0$, но без учета вихревой пелены $p_0 = (1 - M)z_0 u_0$, ($x = 0$).

Выражение для амплитуды акустического давления, индуцированного вихревой пеленой, на выходе из сопла получено в виде

$$p_1 = -\frac{i\rho_0 a}{2kr_0} (i\mu\alpha_0 - 1)u_0 = \rho_0 a \chi_1, \quad \chi_1 = \chi_{11} + i\chi_{12}, \quad \chi_{11} = -\frac{\alpha'}{M}, \quad \chi_{12} = \frac{\alpha''}{M} - \frac{1}{2k_0}$$

$$\alpha_0 = \int_0^{\infty} \frac{\exp(-i\mu\eta)d\eta}{(1+\eta^2)^{3/2}}, \quad \mu = \frac{2k}{M}, \quad \alpha_0 = \alpha' - i\alpha'',$$

Неравенство $\chi_1 < 0$ означает, что между колебаниями, индуцированного вихревой пеленой, и акустическими колебаниями имеет место положительная обратная связь.

Условие возникновения акустических автоколебаний в камере

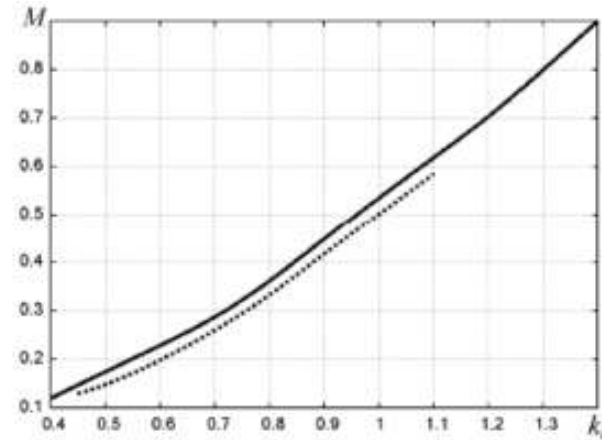
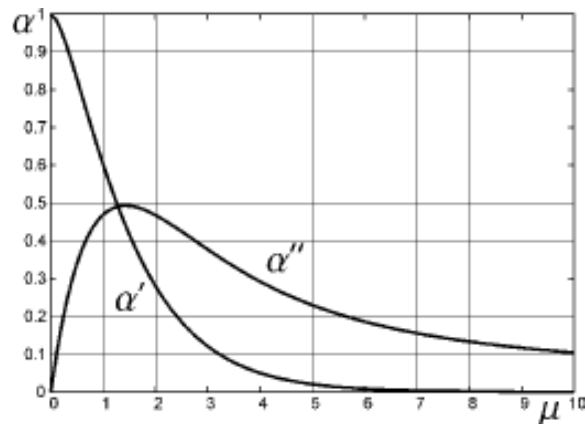
Для возникновения акустических автоколебаний в камере необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$\chi_{01} + \chi_{11} = \frac{(1-M)k_0^2}{4} - \frac{\alpha'}{M} < 0,$$

первый член левой части которого определяет потери акустической энергии на излучение из открытого конца, которые всегда имеют место, второй член определяет полученную в данной работе величину энергии, поступающую в систему в виде обратной связи за счет энергии основного потока. При этом необходимо иметь в виду, что имеют место и дополнительные потери: на трение на рассеяние и др..

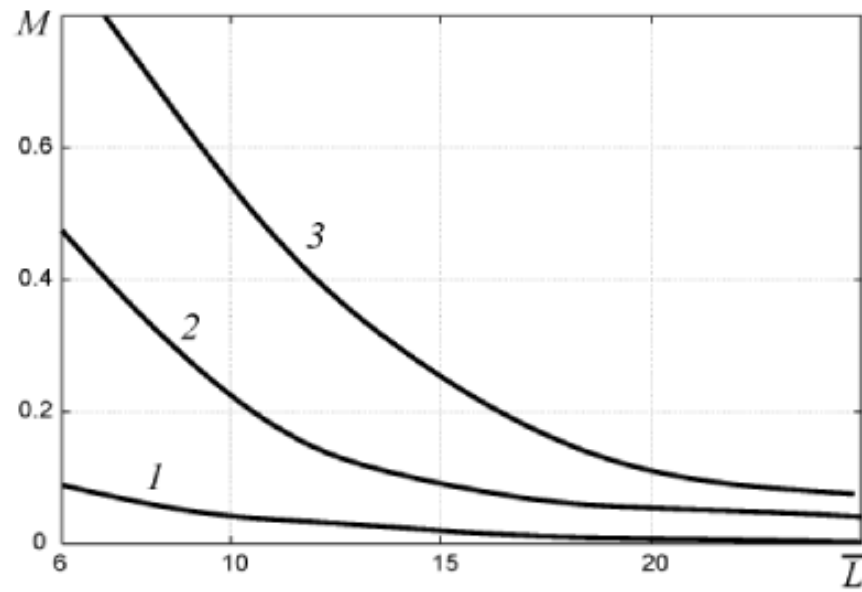
Ниже представлена численная зависимость параметра $\alpha'(\mu)$, его асимптотическое представление, а также приведено сравнение зависимости $M(k_0)$, удовлетворяющей равенству с соответствующими зависимостями (пунктир), которые следуют из известной закономерности коэффициента отражений акустических волн от открытого конца при его значении $R = 1$.

$$\alpha_1 = \exp(-\mu), \quad (\mu \rightarrow \infty)$$

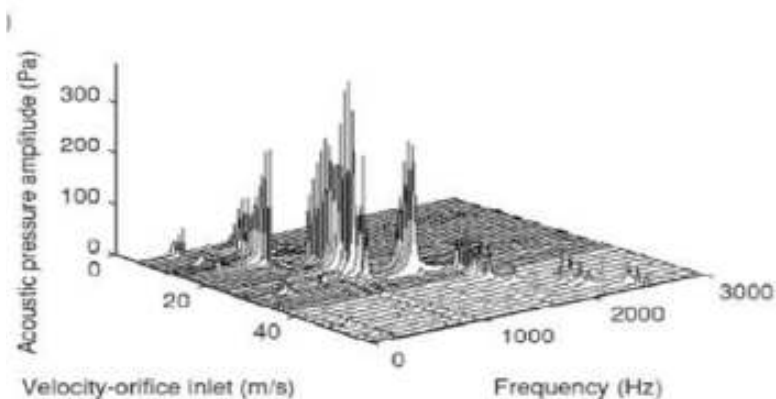
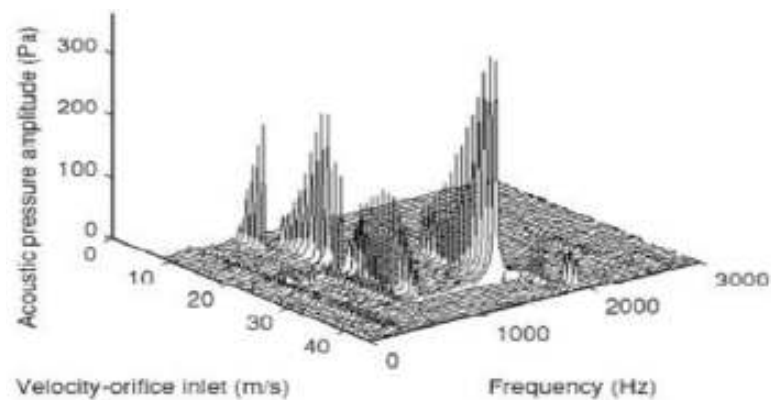


Цилиндр, закрытый с одного конца длины L и радиуса r $\left(\bar{L} = \frac{r}{L} \right)$

На рисунке представлены зависимости, удовлетворяющие решению поставленной задачи при условии $\chi_{01} + \chi_{11} = 0$ для первых трех мод собственных акустических колебаний в трубке, из которых следует, что без учета дополнительных потерь, из которых может быть приближенно определено число мод по которым могут возникнуть акустические автоколебания в трубке заданной длины и заданной скорости истечения потока (модель духовых инструментов). На следующем слайде дано сравнение с экспериментальными данными, из результатов которого следует хорошее качественное их соответствие, а определенное количественное расхождение объясняется неучтенными потерями.



СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

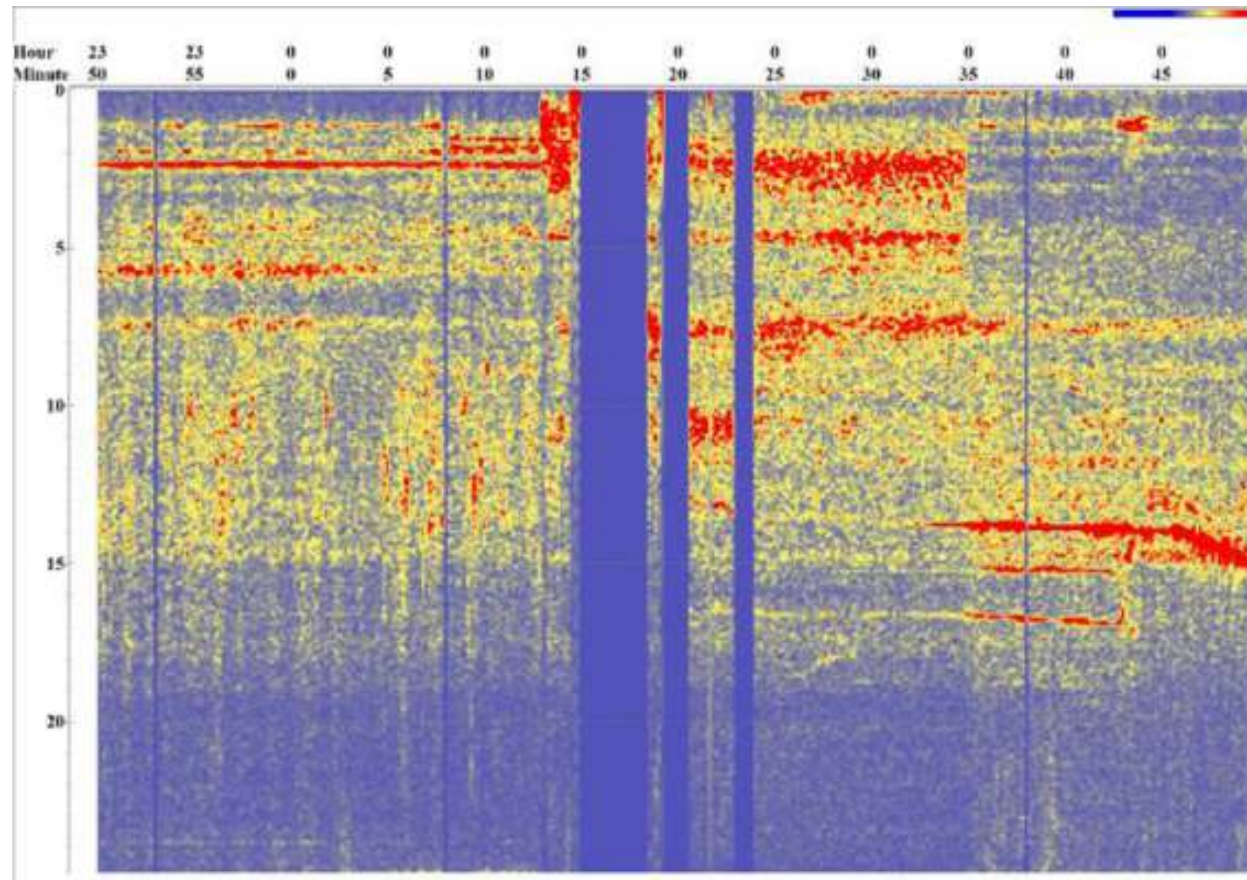


f , Гц	330	700	1000	1300	1600	2200
U , м/с	5	8	17	28	33	42
U^* , м/с	3	5	10	15	20	30

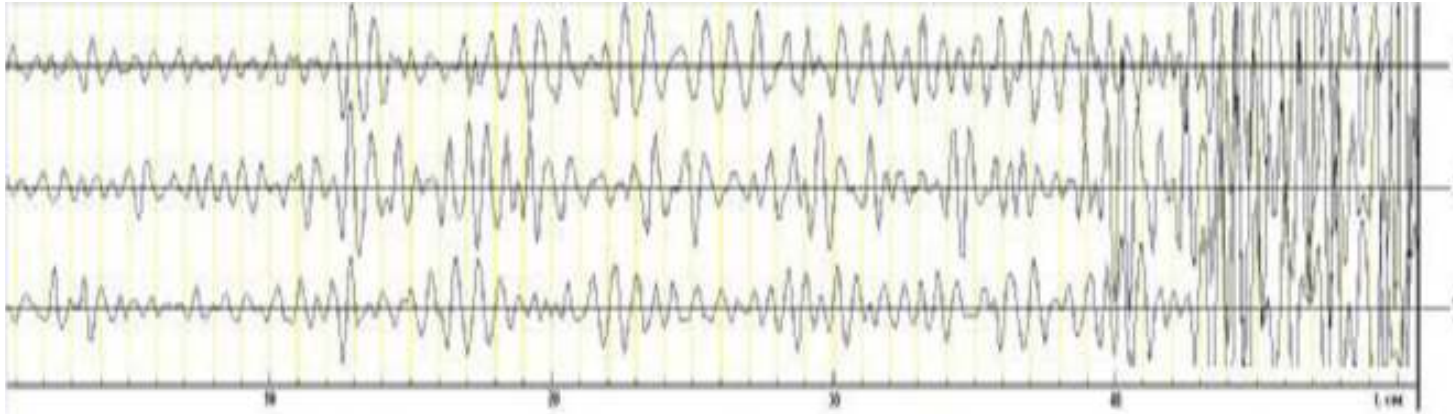
РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АВАРИИ НА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

Есть основание утверждать, что одной из основных причин произошедшей аварии является возникновение в их проточной части гидроакустических автоколебаний. (По оси

ординат - частота в Герцах). До выброса вверх второго гидроагрегата (вертикальная синяя полоса) возникли интенсивные гидроакустические автоколебания, возникновение которых связано с нестационарным взаимодействием потока с турбиной (типа явления помпажа). А после этого, когда все турбины вошли в режим холостого хода возникли автоколебания одновременно по нескольким собственным модам, число которых согласуется с результатами предлагаемой модели.



ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ НЕПОСРЕДСТВЕННО ПЕРЕД АВАРИЕЙ



З а к л ю ч е н и е

Возникновение рассмотренных выше акустических автоколебаний может иметь место в элементах множества конструкций: камерах сгорания РДТТ, проточной части турбоагрегатов, аэродинамических трубах с открытой рабочей частью, духовых музыкальных инструментах и т.д. В ряде случаев они могут привести к катастрофическим последствиям, а в большинстве случаев они ухудшают качество эксплуатации конструкций, генерируя их звучание, которое сопровождает работу агрегата как нежелательный шум.

Целью данного проекта является численное исследование вероятности возникновения условий, при которых могут возникнуть рассматриваемые явления, путем применения современной вычислительной технологии. Понимание механизма их возникновения, которое представлено в докладе, позволит более эффективно искать способы их устранения, чем простой перебор вариантов параметров конструкции и сплошной среды, в которой распространяются акустические волны.