

Проявление “стохастического резонанса” в затопленных струях с акустическим воздействием

П. С. Ланда¹*, В. Г. Ушаков¹†

* Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 117234 Москва, Россия

† Филиал ФГУП ЦАГИ “Московский комплекс ЦАГИ”, 107005 Москва, Россия

Поступила в редакцию 28 июня 2007 г.

Рассмотрено явление, подобное хорошо известному стохастическому резонансу в нелинейных осцилляторах, но вызванное не шумом, а турбулентностью в круглой затопленной струе с гармоническим акустическим воздействием. Показано, что при фиксированном расстоянии от сопла изменение начального уровня турбулентности приводит к немонотонному изменению амплитуды волны на частоте акустического воздействия, а именно, к появлению максимума при некотором значении начальной турбулентности. Качественное объяснение явления состоит в том, что начальная турбулентность действует на систему подобно внешнему шуму: она изменяет эффективные параметры системы и, в частности, перемещает максимумы спектров, что эквивалентно изменению некоторой “собственной” частоты. Такое изменение эффективных параметров струи и приводит к явлению, подобному стохастическому резонансу.

PACS: 02.50.Ey, 05.40.–a, 47.27.–i

Для управления турбулентностью в затопленных струях в работах [1, 2] было предложено облучать струю акустической волной. Авторы показали, что низкочастотная акустическая волна усиливает турбулентность, тогда как высокочастотная волна ее ослабляет. Естественно, что переход от усиления к ослаблению является непрерывным. Дальнейшие исследования акустического воздействия на струю, проведенные многими авторами, выявили целый ряд интереснейших эффектов, например, появление в спектрах дискретных составляющих [3], изменение характера эволюции максимумов спектра с расстоянием от плавного к ступенчатому [4], появление различного рода субгармонических резонансов и ряд других. В настоящей работе излагаются результаты экспериментального исследования еще одного ожидаемого интересного эффекта, вызванного акустическим воздействием, который мы называем стохастическим резонансом по аналогии с классическим стохастическим резонансом, рассмотренным многими авторами [5].

Понятие стохастический резонанс было введено впервые в 1981 г. в связи с потребностью объяснить близкую к периодической (с периодом T , равным приблизительно 100000 лет) смену эпох оледенения Земли [6–9]. Одной из причин такой смены может быть наблюдающееся периодическое изменение эксцентриситета земной орбиты как раз с указанным периодом. Но это изменение очень мало и само по себе

не может вызвать сильное изменение климата. Однако, добавив в выведенные уравнения некоторый шум, авторы указанных работ обнаружили, что в определенном диапазоне интенсивностей шума такие изменения становятся возможными. Так было открыто явление, названное стохастическим резонансом. И хотя вопрос о том, соответствует ли указанное объяснение истинным причинам наблюдаемой смены эпох оледенения Земли, до сих пор окончательно не решен, явление стохастического резонанса стало широко известным [5].

В дальнейшем стохастический резонанс был обнаружен во многих физических, химических и биологических системах [10–13]. В основном исследователи изучали передемпфированные осцилляторы, уравнение которых эквивалентно уравнению движения легкой частицы в бистабильном потенциальном поле, возмущенном белым шумом и гармоническим сигналом. Только в небольшом количестве работ исследуется стохастический резонанс в слабодемпфированных осцилляторах [14–16] под действием белого шума. В некоторых работах вместо белого шума рассматривается цветной шум [17] или хаотический сигнал [18].

Наличие стохастического резонанса многие авторы (см., например, [5, 10]) объясняют совпадением частоты сигнала с половиной средней частоты флуктуационных переходов из одного устойчивого состояния в другое [19–21]. Однако численные эксперименты показали, что приводимые объяснения не соответствуют действительности. В связи с этим бы-

¹) e-mail: planda@mail.ru, uvadim@mail.ru

ла выдвинута строгая теория стохастического резонанса в системах со слабым сигналом [15], где было показано, что причиной стохастического резонанса является изменение эффективных параметров системы под воздействием шума. Например, в случае передемпфированного осциллятора меняется эффективная жесткость и эффективный коэффициент затухания [22, 23], а в слабодемпфированном осцилляторе наиболее существенным является изменение его собственной частоты.

Следуя работе [24], авторы полагают, что турбулентность в затопленной струе возникает в результате усиления возмущений, имеющих на выходе из сопла. В работах [25–28] рассмотрена задача об устойчивости струи в рамках линеаризованных уравнений Эйлера. Подобная задача решена и в [29, 30], но с использованием уравнения Навье–Стокса. Показано, что спектр турбулентных пульсаций в струе зависит от расстояния от сопла, причем максимум спектра сдвигается с ростом расстояния в направлении низких частот. Этот эффект также наблюдался экспериментально многими исследователями (см., например, [31] и ссылки в ней). В качестве иллюстрации см. рис.1, полученный в ходе наших экспериментов.

Звуковая волна, действующая на струю, превращаясь в гидродинамическую, также усиливается, причем коэффициент усиления оказывается немонотонной функцией расстояния (имеет максимум) [32]. Это проиллюстрировано также на рис.2, полученном в наших экспериментах. В работе [32] и многих следующих за ней этот эффект объяснялся наличием нелинейного насыщения. Однако в дальнейшем [26] было показано, что указанная немонотонная зависимость коэффициента усиления от расстояния следует из линейных уравнений Эйлера и обусловлена только расширением струи с расстоянием. Подобные результаты следуют также и из работы [29]. Качественное объяснение такой зависимости можно дать, исходя из модели струи в виде набора резонаторов, собственные частоты которых изменяются при изменении расстояния от сопла и от оси струи.

Стохастический резонанс возникает при изменении уровня начальной турбулентности и является существенно нелинейным эффектом. Измерения показывают, что при увеличении уровня начальной турбулентности спектр пульсаций продольной скорости изменяется, а его максимум сдвигается (рис.3). В результате изменяется разность между частотой акустического воздействия и “собственной” частотой струи в данном сечении, что и приводит к явлению

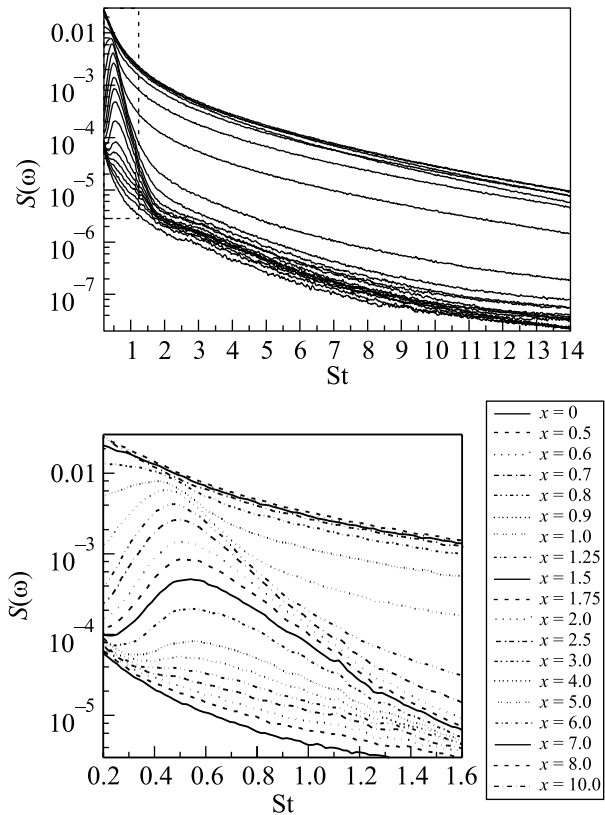


Рис.1. Зависимость спектральной плотности пульсаций продольной скорости от числа Струхала St для разных расстояний от сопла. Внизу показана в увеличенном масштабе часть верхнего графика, выделенная пунктиром

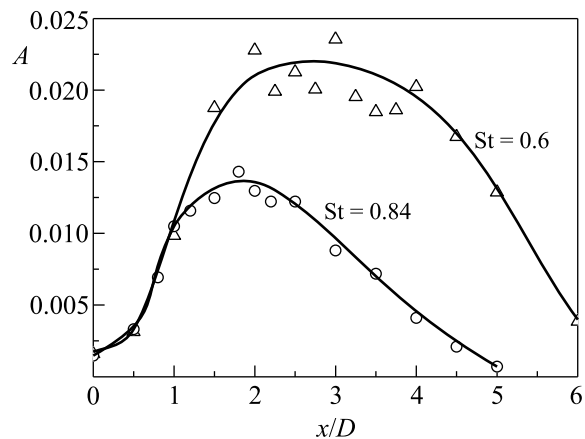


Рис.2. Зависимость амплитуды волны с частотой акустического воздействия от расстояния от сопла для двух значений числа Струхала St

стохастического резонанса, подобного рассмотренному в [15, 16].

Эксперименты проводились с круглой затопленной струей воздуха, истекающей из сопла диамет-

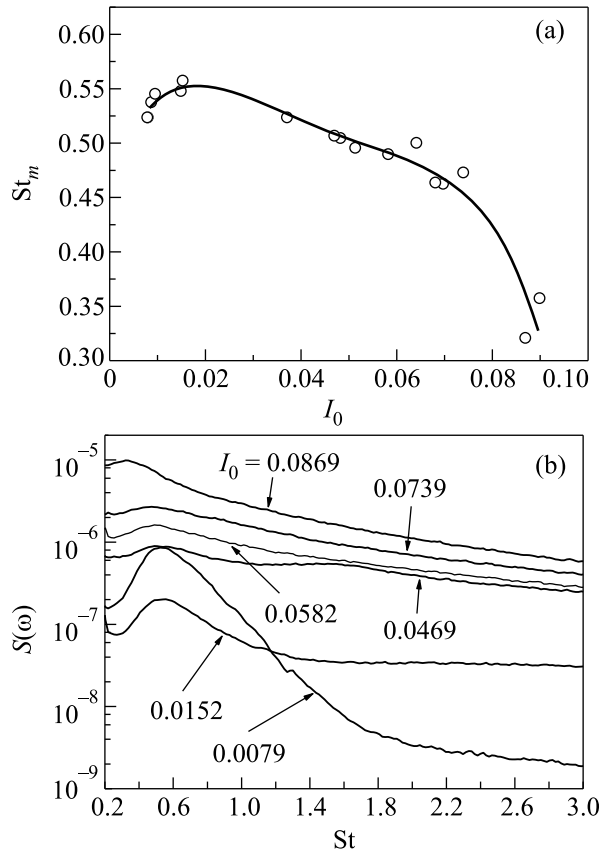


Рис.3. (а) Зависимость максимума в спектре пульсаций продольной скорости St_m от уровня начальной турбулентности для невозбужденной струи на расстоянии $x = 1.5D$; (б) – примеры спектральной плотности мощности пульсаций продольной скорости для невозбужденной струи на расстоянии $x = 1.5D$ при разных уровнях начальной турбулентности

ром $D = 30$ мм со средней скоростью $u_0 = 17.7$ м/с, что при указанных параметрах соответствует числу Рейнольдса $Re \approx 34600$. В поперечном направлении струя облучалась звуковой волной с одной из частот $f_a = 500$ Гц и $f_a = 700$ Гц и интенсивностью 120 дБ с помощью динамика, подключенного к генератору синусоидальных сигналов. Интенсивность звука контролировалась вблизи среза сопла с помощью микрофона (B & K, тип 4136). Схема установки приведена на рис.4.

Изменение уровня начальной турбулентности $I_0 = \sqrt{(\delta u_0)^2}/u_0$, где $\sqrt{(\delta u_0)^2}$ – среднеквадратичное значение пульсаций продольной скорости, достигалось при помощи установки различных перфорированных пластин внутрь сопла на расстоянии 70 мм от среза сопла, при этом средняя продольная скорость истечения на выходе из сопла поддерживалась постоянной. Измерения продольной скорости

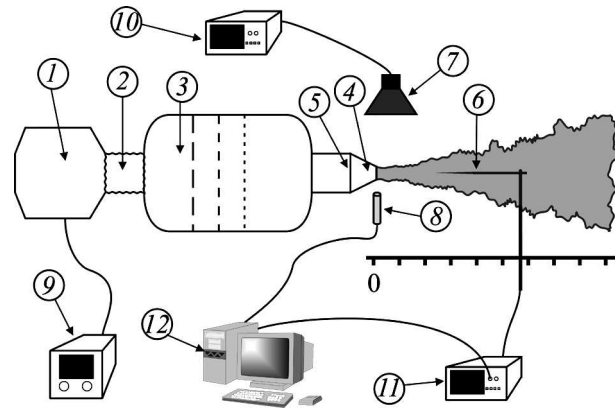


Рис.4. Схема экспериментальной установки: 1 – источник воздуха (вентилятор), 2 – мягкая муфта, 3 – успокоительная камера с детурбулизирующими сетками, 4 – сопло, 5 – место установки перфорированных пластин, 6 – датчик термоанемометра, 7 – динамик, 8 – микрофон, 9 – потенциометр регулировки скорости потока, 10 – генератор синусоидальных сигналов, 11 – термоанемометр, 12 – компьютер

струи $u(t)$ проводились в заглушенной камере с помощью термоанемометра постоянной температуры (DISA 55M01), датчик которого мог двигаться вдоль оси струи.

Явление стохастического резонанса можно наблюдать в любом сечении струи, в котором спектральная составляющая невозбужденной струи на частоте акустического сигнала не является малой. Мы выбрали сечение струи, находящееся на расстоянии $x = 1.5D$ от среза сопла. В процессе измерений мы определяли интенсивность пульсаций продольной скорости в центре выходного сечения сопла и амплитуду волны $A = \sqrt{A_s^2 + A_c^2}$ на частоте акустического воздействия в указанном сечении на оси струи. Вычисление амплитуды волны проводилось по формулам

$$A_s = \frac{2}{nT} \left\langle \int_0^{nT} \frac{\delta u(t)}{u_0} \sin \omega t dt \right\rangle,$$

$$A_c = \frac{2}{nT} \left\langle \int_0^{nT} \frac{\delta u(t)}{u_0} \cos \omega t dt \right\rangle,$$

где A_s и A_c – синусная и косинусная компоненты волны на частоте акустического воздействия ω , $T = 2\pi/\omega$, $\delta u(t) = u(t) - \bar{u}$ – пульсационная составляющая продольной скорости, \bar{u} – среднее по времени значение продольной скорости при $x = 1.5D$, n – целое число, угловые скобки означают усреднение по ансамблю различных реализаций $u(t)$.

Зависимости амплитуды A от I_0 представлены на рис.5.

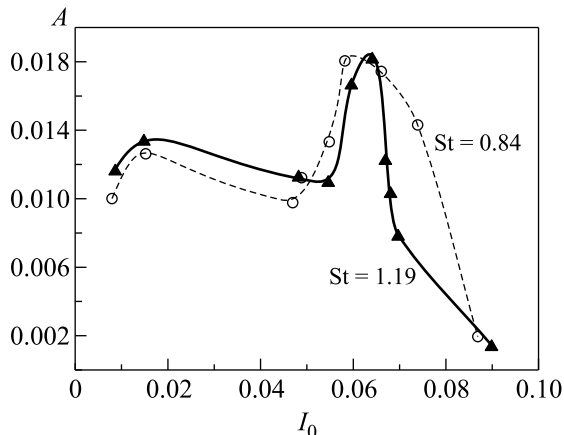


Рис.5. Зависимость амплитуды волны с частотой акустического воздействия от уровня начальной турбулентности

Из рисунка видно, что каждая из приведенных зависимостей имеет два максимума: большой и маленький. Для частоты акустического воздействия 500 Гц ($St = 0.84$) большой максимум расположен при $I_0 \approx 0.058$, а маленький – при $I_0 \approx 0.0152$; во втором случае большой максимум расположен при $I_0 \approx 0.064$, а маленький – при $I_0 \approx 0.0148$. Отметим, что зависимости положения обоих максимумов от частоты акустического воздействия имеют тот же характер, как и в случае стохастического резонанса в слабодемпфированном осцилляторе [15, 16]. Это лишь раз говорит о том, что явление стохастического резонанса является очень общим и проявляет себя подобным образом для систем с различными нелинейностями и различными типами возмущений. Более того, возмущение вообще может быть не случайным, а регулярным [33, 34].

В заключение отметим, что описанное нами явление стохастического резонанса в затопленных струях, по-видимому, обнаружено нами впервые.

Авторы выражают благодарности А.С. Гиневскому, Р.К. Каравосову и В.Ф. Копьеву за полезные обсуждения, а также Е.В. Власову и Т.М. Макарею за помощь в организации экспериментов.

1. Е. В. Власов, А. С. Гиневский, Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа **4**, 133 (1967).
2. Е. В. Власов, А. С. Гиневский, Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа **6**, 37 (1973).
3. P. S. Landa, A. A. Zaikin, A. S. Ginevsky, and Ye. V. Vlasov, Int. Journal of Bifurcation and Chaos **9**, 397 (1999).

4. V. Kibens, AIAA J. **18**, 434 (1980).
5. L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, and F. Marchesoni, Rev. Mod. Phys. **70**, 223 (1998).
6. R. Benzi, A. Sutera, and A. Vulpiani, J. Phys. A: Math. Gen. **14**, L453 (1981).
7. R. Benzi et al., Tellus **34**, 10 (1982).
8. C. Nicolis, Solid Phys. **74**, 473 (1981).
9. G. Nicolis and C. Nicolis, Tellus **33**, 225 (1981).
10. В. С. Анищенко, А. Б. Нейман, Ф. Мосс, Л. Шиманский-Гайер, УФН **169**, 7 (1999).
11. P. E. Greenwood, L. M. Ward, D. F. Russell et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 4773 (2000).
12. P. Hänggi, European J. Chem. Phys. and Phys. Chem. **3**, 285 (2002).
13. В. С. Анищенко, М. В. Ануфриева, Т. Е. Вадивасова, Письма в ЖЭТФ **32**, 12 (2000).
14. М. И. Дыкман, П. В. Е. МакКлинток, Р. Маннелла, Н. Г. Стокс, Письма в ЖЭТФ **52**, 780 (1990).
15. P. S. Landa, *Regular and Chaotic Oscillations*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2001.
16. P. S. Landa and P. V. E. McClintock, послано в Phys. Rev. E (2007).
17. A. Neiman and W. Sung, Phys. Lett. A **223**, 341 (1996).
18. S. Sinha, Physica A **270**, 204 (1999).
19. Л. С. Понtryгин, А. А. Андронов, А. А. Витт, ЖЭТФ **3**, 165 (1933).
20. H. A. Kramers, Physica **7**, 284 (1940).
21. П. С. Ланда, Р. Л. Стратанович, Вестник МГУ, Физика и Астрономия **1**, 33 (1962).
22. П. С. Ланда, ДАН **339**, №4, 1 (2004).
23. P. Landa, V. Ushakov, and J. Kurths, Chaos Solitons and Fractals **30**, 574 (2006).
24. П. С. Ланда, Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика **3**, №2, 37 (1995).
25. D. G. Crighton and M. Gaster, J. Fluid Mech. **77**, 397 (1976).
26. P. Plaschko, J. Fluid Mech. **92**, 209 (1979).
27. A. Michalke, Progr. Aerosp. Sci. **21**, 159 (1984).
28. M. Gaster, J. Fluid Mech. **424**, 367 (2000).
29. P. S. Landa and P. V. E. McClintock, Phys. Reports **397**, 1 (2004).
30. П. С. Ланда, В. Г. Ушаков, Вестник МГУ **3**, 31 (2005).
31. А. С. Гиневский, Е. В. Власов, Р. К. Каравосов, Акустическое управление турбулентными струями, М.: Физматлит, 2001.
32. Y. Y. Chan, Phys. Fluids **17**, 46 (1974).
33. P. S. Landa and P. V. E. McClintock, J. Phys. A: Math. Gen. **33**, L433 (2000).
34. I. I. Blekhman and P. S. Landa, Int. J. of Non-linear Mechanics **39**, 421 (2004).