

АКУСТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ КИПЕНИИ

А.В. КОРОЛЬКОВ, *проф. каф. прикладной математики и математического моделирования МГУЛ, д-р физ.-мат. наук*

korolkov@mgul.ac.ru

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ

Большое количество исследовательских работ посвящено изучению шума при нагреве и кипении жидкости. В книге Е.И. Несиса приводится обзор таких работ. Однако единой точки зрения на механизм образования шума при нагреве жидкости и кипении нет. Большинство исследователей считают, что шум исходит от схлопывания в недогретой жидкости на нагревателе паровых пузырей. Автор этой работы полагает, что источником шума при нагреве жидкости является температурное расширение жидкости, не обязательно сопровождаемое фазовым переходом (появлением паровых пузырей). Простые опыты на домашней кухне позволяют это проиллюстрировать. В настоящей работе построена одномерная математическая модель распространения звука в слое жидкости. Источником волн сжатия и разрежения является температурное расширение жидкости около нагревателя. В вычислительном эксперименте установлены зависимости интенсивности и высоты звука от интенсивности нагрева, теплофизических свойств жидкости, геометрических параметров и степени заполнения емкости.

Ключевые слова: шум при нагреве и кипении жидкости, паровые пузыри, температурное расширение, математическая модель, вычислительный эксперимент.

В середине двадцатого века большое количество исследовательских работ было посвящено изучению кипения и шума при нагреве и кипении жидкости. В книге Е.И. Несиса [1] приводится обзор таких работ. Однако единой точки зрения на механизм образования шума при нагреве жидкости и кипении среди авторов нет. Большинство из них считали, что шум исходит от схлопывающихся в недогретой жидкости на нагревателе паровых пузырей [2, 3]. Такой точки зрения придерживаются и современные педагоги и ученые [4–9]. Автор работы полагает, что источником шума при нагреве жидкости является температурное расширение жидкости, не обязательно сопровождаемое фазовым переходом (появлением паровых пузырей). Простые опыты на домашней кухне позволяют это проиллюстрировать. В настоящей работе построена одномерная математическая модель распространения звука в слое жидкости. Источником волн сжатия и разрежения является температурное расширение жидкости около нагревателя. В вычислительном эксперименте установлены зависимости интенсивности и высоты звука от интенсивности нагрева, теплофизических свойств жидкости, геометрических параметров и степени заполнения емкости.

Хорошо известно, что при нагреве жидкости возникают характерные шумы. Уровень и тон шума зависят от многих факторов, таких как интенсивность нагрева, теплофизи-

ческие свойства жидкости, геометрические параметры и степень заполнения емкости.

Проведем простой опыт с электрическим чайником типа «Tefal». Нальем воды и включим чайник. Откроем крышку и заглянем внутрь. Через несколько секунд мы услышим характерное шипение. Поверхность нагревателя хорошо видна, на ней нет «мути» от мелких пузырьков пара (наблюдаются некоторые искажения вида поверхности нагревателя, связанные с неоднородностью плотности жидкости в естественно-конвективном течении). Через некоторое время появляется «муть» (это очень мелкие пузыри пара), затем – все более и более крупные пузыри, тон звука становится ниже, интенсивность звука – меньше и, наконец, звук исчезает при развитии пузырькового кипения.

Проведенный опыт дает основание полагать, что существует механизм образования звука, не связанный с наличием паровых пузырей на нагревателе. В подтверждение этого давайте поставим еще один простенький опыт с электрическим чайником. Наполним чайник водой до отметки min и включим его. Когда звук нагреваемой воды стабилизируется, дольем в чайник еще такой же объем холодной воды. Через несколько секунд звук возобновится, но тон его будет примерно в два раза ниже. Добавление холодной воды «возвращает» процесс на более раннюю стадию нагрева, когда паровые пузыри более мелких размеров.

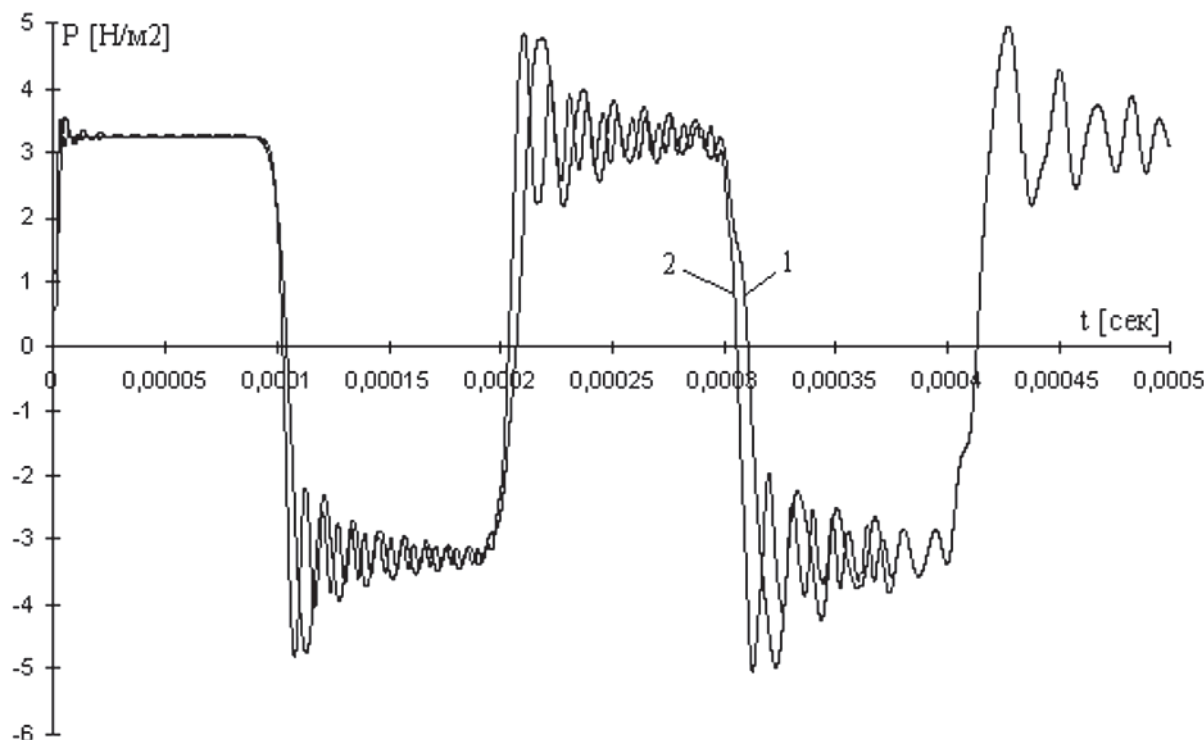


Рисунок. Результат расчета пульсаций избыточного давления у поверхности нагревателя
Figure. The result of the calculation of excess pressure fluctuations at the surface of the heater

Если бы тон звука зависел только от размеров паровых пузырей, то в соответствии с первым опытом он должен был повыситься.

Рассмотрим процесс нагрева жидкости в условиях полной невесомости (чтобы исключить естественную конвекцию). Будем считать, что жидкость является упругой средой, то есть плотность жидкости зависит не только от температуры, но и от давления. Количественной характеристикой упругости жидкости может служить величина

$$k = \partial P / \partial \rho = a^2, \quad (1)$$

где a – скорость звука в жидкости.

Одномерное движение столба жидкости высоты L , нагреваемого с основания заданным тепловым потоком q , может быть описано системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \cdot u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ \rho = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) + \frac{1}{k} P \end{cases} \quad (2)$$

В начальный момент

$$T = T_0, u = 0, \rho = \rho_0. \quad (3)$$

На поверхности нагревателя ($x = 0$)

$$u = 0, \partial P / \partial x = 0, \lambda \cdot (\partial P / \partial x) = -q. \quad (4)$$

На свободной поверхности ($x = L$)

$$P = 0, \partial T / \partial x = 0. \quad (5)$$

Система (2–5) решалась численно методом конечных разностей. Решение представлено на рисунке для воды с начальной температурой 20°C , плотность теплового потока $q = 10^4 \text{ Вт/м}^2$, глубина заполнения (высота столба) $L = 0,05 \text{ м}$. Расчеты проведены на различных конечно-разностных сетках (1 – 100 узлов, 2 – 200 узлов по пространственной координате X).

Чередования волны сжатия с волной разрежения вызваны оттеснением столба жидкости при температурном расширении жидкости около нагревателя и сбросом давления на свободной поверхности. Из расчетов следует, что амплитуда пульсаций давления (громкость шума) пропорциональна интенсивности нагрева (плотности теплового потока), частота пульсаций давления (тон шума) обратно пропорциональна высоте заполнения емкости.

Таким образом, увеличение объема жидкости при ее нагреве является причиной возникновения пульсаций давления. Приведенная одномерная модель лишь иллюстрирует механизм возникновения пульсаций давления. В реальном случае процесс не является одномерным и представляется существенно более сложным. В силу несогласованности пульсаций в различных точках поверхности нагревателя может происходить взаимодействие возмущений и изменение параметров пульсаций, по этой же причине могут рождаться локальные циркуляционные течения.

В поле сил тяжести конвективные движения жидкости обеспечивают подвод холодной жидкости к поверхности нагревателя, что изменяет условия возбуждения пульсаций давления.

Библиографический список

1. Несис, Е.И. Кипение жидкостей / Е.И. Несис. – М.: Наука, 1973. – 280 с.
2. M.F. Osborne, F.H. Holland, J. Acoust. Soc. Amer. 19, № 1, 13 (1947)
3. J.W. Westwater, A.J. Lowery, F.S. Pramuk, Science 122, 332 (1955)
4. Королев, А.В. Причины возникновения термоакустических колебаний в обогреваемых каналах / А.В. Королев, А.Н. Литвин // Тр. Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 1999. – Вып. 2(8). – С. 123–126.
5. Перышкин, А.В. Физика. 8 класс / А.В.Перышкин. – Дрофа. – 2008.
6. Мокрова, И.И. Физика. 8 класс: поурочные планы по учебнику А.В. Перышкина «Физика. 8 класс», 2 части / И.И. Мокрова. – М.: Учитель-АСТ, 2003.
7. Единая Коллекция ЦОР № 186334 «Парообразование при кипении». <http://school-collection.edu.ru/catalog/>
8. Единая Коллекция ЦОР № 186485 «Что такое кипение» <http://school-collection.edu.ru/catalog/>
9. Единая Коллекция ЦОР № 205984 «Кипение. Удельная теплота парообразования». <http://school-collection.edu.ru/catalog/>

ACOUSTIC PHENOMENA ON BOILING

Korol'kov A.V., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Physics and Mathematics)

korolkov@mgul.ac.ru

Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moscow reg., Russia

Many research papers are devoted to studying the noise during heating and boiling of a liquid. A book by E. I. Nesis provides a review of such works. However, a single point of view on the mechanism of noise formation during heating and boiling of a liquid is not present. Most researchers consider that the reason for this noise is steam bubbles collapse in the liquids near a heater. The author of this work believes that a source of noise during heating is the temperature expansion of a liquid which is not necessarily accompanied by phase transition (steam bubbles occurrence). Simple experiences on home kitchen allow to illustrate it. In this work a one-dimensional mathematical model of sound distribution in a layer of a liquid is constructed. A source of the waves of compression and underpressure is a temperature expansion of a liquid nearby a heater. By a computing experiment the dependences of intensity and frequency of a sound from intensity of heating, properties of a liquid, geometrical parameters and a degree of filling of capacity are established.

Keywords: noise at heating and boiling of a liquid, steam bubbles, temperature expansion, mathematical model, computing experiment.

Referencrs

1. Nesis E.I. *Kipenie zhidkostey* [Boiling of liquids]. Moscow: Science, 1973, 280 p.
2. Osborne M.F., Holland F.H., Acoust. Soc. Amer. 19, № 1, 13 (1947).
3. Westwater J.W., Lowery A.J., Pramuk F.S., Science 122, 332 (1955).
4. Korolev A.V., Litvin A.N. *Prichiny vozniknoveniya termoakusticheskikh kolebaniy v obogrevaemykh kanalakh* [Causes of thermoakustic oscillations in the heated channels]. Odessa, 1999. Vol. 2 (8). p. 123-126.
5. Peryshkin A.V. *Fizika. 8 klass* [Physics. 8 class]. Drofa. 2008.
6. Mokrova I.I. *Fizika. 8 klass: pourochnoe plany po uchebniku A.V.Peryshkina «Fizika. 8 klass»* [Physics. class 8: plans based on A.V. Peryshkin's textbook «Physics. 8 class»] 2 parts. Moscow: Teacher-Ast. 2003.
7. *Edinaya Kolleksiya TsOR № 186334 «Paroobrazovanie pri kipenii»* [The Single Collection COR № 186334 «Vaporization at boiling»], <http://school-collection.edu.ru/catalog/>.
8. *Edinaya Kolleksiya TsOR № 186485 «Chto takoe kipenie»* [The Single Collection COR № 186485 «What is a boiling»], <http://school-collection.edu.ru/catalog/>.
9. *Edinaya Kolleksiya TsOR № 205984 «Kipenie. Udel'naya teplota paroobrazovaniya»* [The Single Collection COR № 205984 «Boiling. Specific heat of vaporization»], <http://school-collection.edu.ru/catalog/>.