

настройки метода. Некоторые точные интерполяторы предполагают задание коэффициента сглаживания. Ненулевое значение этого параметра превращает точный интерполятор в сглаживающий. Точные интерполяторы учитывают исходную точку наблюдения точно (включают ее в цифровое поле) только тогда, когда эта точка совпадает с узлом сетки. Если точка данных не совпадает с узлом сети, то она не включается в матрицу сеточных значений, даже если используется точный интерполятор. Сглаживающие интерполяторы или сглаживающие параметры точных интерполяторов используются, как правило, в тех случаях, когда данные наблюдений измерены не точно, а с некоторой погрешностью. Большинство методов восстановления функции и построения цифрового поля основаны на вычислении весовых коэффициентов, с помощью которых взвешиваются значения данных замеров в точках наблюдений. Это значит, что при прочих равных условиях, чем ближе точка данных к узлу сети, тем больший вес она имеет при определении значения восстанавливаемой функции в этом узле.

В докладе приводятся характеристики и особенности применения следующих методов: триангуляция с линейной интерполяцией (Triangulation with Linear Interpolation), минимальной кривизны (Minimum Curvature), полиномиальной регрессии (Polynomial Regression), степени обратного расстояния (Inverse Distance to a Power), Шепарда (Shepard's Method), радиальных базисных функций (Radial Basis Functions, Крайгинга (Kriging), алгоритм составной сплайн аппроксимации системы ГеоБаза Данных.

Литература

1. Барвенков, С. А. *Методика, инструментарий адаптации математических моделей процессов подземной гидродинамики* / С. А. Барвенков, М. Ф. Кибаш, В. Б. Таранчук // Выбранные научные работы БДУ, т. "Математика". Минск, 2001. С. 7-33.
2. Войтешенко, И. С. *Геоинформационная поддержка лесного и воздушного мониторинга* / И. С. Войтешенко, А. П. Кулагин, В. Б. Таранчук // Вестник БГУ. Сер. 2/2002. Химия. Биология. География. 2002. С. 43-49.
3. Лиштван, И. И. *Моделирование и графическая визуализация распространения водорастворимых загрязняющих веществ в деятельном слое почвогрунтов* / И. И. Лиштван, Г. П. Бровка, В. Б. Таранчук и др. // Природные ресурсы. 2004. №1. С. 124–126.
4. Ясовеев, М. Г. *Геоэкология Беларуси* / М. Г. Ясовеев, В. Б. Таранчук и др. Мн.: Право и экономика. 2006. (С. 72–96).
5. Дэвис, Дж. С. *Статистический анализ данных в геологии*. (В 2-х книгах). Книга 2. М.: Недра, 1990.
6. Де Мерс. *Географические информационные системы*. М.: 1999.
7. Sacks, J. *Design and Analysis of Computer Experiments*. / J. Sacks, W. J. Welch, T. J. Mitchell, H. P. Wynn // Statistical Science. 1989. P. 409–435.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОНОВСПЫШКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕЖИМА ОДНОПУЗЫРЬКОВОЙ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Н. А. ТЕТЕРЕВ (МОСКВА, РОССИЯ)

Эффект свечения одиночного пузырька в жидкости при определенной конфигурации ультразвукового поля был обнаружен в 1992 году, и сразу привлек к себе большое

внимание исследователей. Это явление было названо сонолюминесценцией, как и давно известный эффект многопузырькового свечения, возникающего при кавитационном режиме воздействия акустического поля на жидкую среду. Однако механизмы возникновения этих близких по своим внешним проявлениям свечений различны. Так возникновение многопузырьковой сонолюминесценции описывается теорией локальной электризации кавитационных пузырьков, а сонолюминесценция одиночного пульсирующего пузырька имеет тепловую природу [1]. Удивительной особенностью однопузырьковой сонолюминесценции является ее стабильность. Стационарный режим свечения пузырька в фокусирующей сферической камере может продолжаться в течении нескольких часов, что позволяет с высокой точностью проводить измерения и экспериментально исследовать динамику этого явления.

Разработанное программное обеспечение [2] позволяет проводить численное исследование режима сонолюминесценции одиночного пузырька в трех приближениях. Первое приближение – описание пульсаций пузырька газа с помощью уравнений Рэлей-Плессетского типа: уравнение Херинга-Флина, уравнение Келера-Миксиса или модель Гилмора. Общая форма записи уравнений Рэлей-Плессетского типа может быть представлена в виде

$$\dot{v} = F(R, v, X_n, Y_n, t), \quad v = \dot{R},$$

где v – радиальная скорость поверхности пузырька, точка над переменной означает производную по времени, R – радиус пузырька, X_n – набор параметров, описывающих свойства газа в пузырьке и окружающей его жидкости, таких как вязкость, поверхностное натяжение, скорость звука и т. д., Y_n – набор параметров, описывающих ультразвуковое поле, таких как амплитуда, частота и т. д. Во втором приближении использовался комбинированный подход, когда газ внутри пузырька рассматривался в газодинамическом приближении, а получающееся при этом значение давления на его границе с жидкостью являлось входным параметром при решении уравнений Рэлей-Плессетского типа. В свою очередь полученные при этом значения радиуса пузырька и скорости перемещения его поверхности использовались в качестве граничных условий, описывающих движение сферического поршня для решения газодинамической задачи. В третьем приближении и газ и окружающая его жидкость рассматривались как сжимаемые среды, математическая модель которых представляет собой систему газодинамических уравнений, записанную в лагранжевых массовых координатах для сферически симметричного случая:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho} \right) &= \frac{\partial (ur^2)}{\partial m}, \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= -r^2 \frac{\partial p}{\partial m}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) &= -\frac{\partial}{\partial m} (r^2 pu) + \frac{\partial}{\partial m} \left(\lambda_g(T) r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \end{aligned}$$

где ρ , u , p , ε , T – плотность, радиальная скорость, давление, внутренняя энергия и температура в рассматриваемых средах, а λ_g – удельная теплопроводность газа в общем случае зависящая от температуры.

При моделировании газодинамического течения внутри газового пузырька помимо уравнения состояния идеального газа использовалось уравнение состояния Ван-дер-Ваальса для реальных газов. Это позволило избежать в некоторых случаях возник-

новения необоснованно высоких плотностей газа при сжатии. В качестве уравнения состояния для воды использовалось акустическое приближение. Из-за большого температурного градиента, возникающего в центре пузырька в момент сжатия, в уравнение энергии введен член, описывающий процесс теплопроводности в газовой среде. Поскольку диапазон изменения температуры очень большой, необходимо учитывать зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. Кроме того, такая запись позволяет описывать и сильно нелинейную зависимость электронной теплопроводности от температуры, играющую при высоких температурах значительную роль в теплообмене.

Расчеты, выполненные с учетом реального течения газа внутри пузырька, показали, что оно приводит к необратимости осцилляционной динамики даже в адиабатическом приближении, в отличие от решений по моделям Рэлей-Плессетского типа. Это связано с тем, что при одном и том же значении радиуса пузырька в процессе сжатия давление на его поверхности в основном оказывается выше, чем при расширении. В результате этого происходит непрерывная накачка энергии в пузырек, а это в свою очередь изменяет частотные и амплитудные характеристики возникающих колебаний. Таким образом, выход на стационарный режим в этом случае будет означать равенство потерь энергии пузырьком на излучение и теплопередачу за один период акустического поля величине накачки энергии за этот же промежуток времени.

На основании результатов серии расчетов определена область возникновения режима сонолюминесценции для пузырька в воде в переменных частота акустического поля – радиус пузырька. Проанализировано влияние на характер осцилляционной динамики таких параметров как радиус пузырька, частота акустического поля и амплитуда акустического давления, вязкость жидкости и поверхностное натяжение. Исследовано влияние на сонолюминесценцию наличия в пузырьке водяного пара согласно модели, предложенной в [1]. По профилю температурного пика, возникающего в центральной части пузырька в режиме однопузырьковой сонолюминесценции, проведена оценка длительности соновспышки, которая, как оказалось, лежит в наносекундном диапазоне времен, что согласуется с экспериментальными данными.

На основании полученных данных по распределению параметров газа внутри пузырька можно сделать вывод, что учет теплопроводности и применение в качестве уравнения состояния уравнения Ван-дер-Ваальса снижают пиковые значения температуры и давления в моменты экстремального сжатия. Для уточнения параметров соновспышки и детального анализа выхода осцилляционной динамики пузырька на стационарный режим необходимо дополнить построенную модель расчетом процессов радиационных потерь за счет высвета и теплопередачи между газом и жидкостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ, в рамках проекта В-1213.

Литература

1. Маргулис М.А. *Сонолюминесценция*// Успехи физических наук, 2000. Т. 170, № 3. С. 263–287.
2. Тетерев Н.А. *Численное исследование режима сонолюминесценции одиночного пузырька*// Научная сессия МИФИ. Сборник научных трудов. 2008. Т.7. С. 205–206.