

П. Д. Лобанов^{1}, Н. А. Прибатурин¹, И. К. Кабардин¹, К. С. Зубанов¹*

Развитие ультразвукового метода для классификации режимов двухфазного потока

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: ivankabardin@gmail.com

Аннотация. Разработка методов идентификации режимов течения газожидкостного двухфазного потока имеет большое значение для инженерных исследований и промышленности. В этой работе предложен метод идентификации картины течения двухфазного потока в канале. Этот метод можно потенциально использовать для развития метода машинного обучения с помощью нейронных сетей. Картины газожидкостного двухфазного течения и соответствующие сигналы с ультразвуковых датчиков получены в прямоугольном канале. В качестве характеристического параметра во временной области используется размах. Контроль параметров течения осуществляется с помощью жидкостного расходомера и контроллера потока Bronhorst El-Flow.

Ключевые слова: классификация режимов, двухфазный поток, ультразвук

P. D. Lobanov^{1}, N. A. Pribaturin¹, I. K. Kabardin¹, K. S. Zubanov¹*

Development of an Ultrasonic Method for Classifying Two-Phase Flow Regimes

¹ S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: ivankabardin@gmail.com

Abstract. The development of methods for identifying the flow regimes of a gas-liquid two-phase flow is of great importance for engineering research and industry. In this work, a method for identifying a flow pattern of a two-phase flow in a channel is proposed. This method can potentially be used to develop a machine learning method using neural networks. Pictures of gas-liquid two-phase flow and the corresponding signals from ultrasonic sensors were obtained in a rectangular channel. Peak-to-peak is used as the characteristic parameter in the time domain. The flow parameters are monitored using a liquid flow meter and the Bronkhorst El-Flow flow controller.

Keywords: classification of modes, two-phase flow, ultrasound

Введение

Двухфазные потоки широко распространены в природе и современных технологиях. Они используются в различных промышленных процессах в энергетике (котлы с бурлящим и циркулирующим кипящим слоем), каталитической химии, нефтехимии, металлургии и других отраслях промышленности. Качественная картина изменения режима в аппаратах со смесью газа и жидкости при увеличении скорости газа показана на рис. 1. Если увеличить скорость потока газа в газожидкостном потоке внутри трубы, то наблюдается смена режимов: пузырьковый, сливной, пенный, кольцевой, кольцевой дисперсный режимы. Классифи-

кация режимов важна, поскольку их смена приводит к резкому изменению гидравлического режима и требует перестройки всей системы.

Цель данной работы заключается в развитии метода для классификации режимов двухфазного потока на основе применения ультразвука.

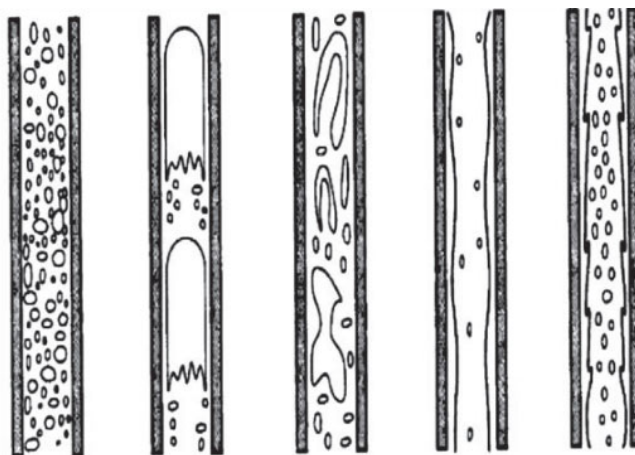


Рис. 1. Смена режимов в аппарате со смесью жидкости и газа при увеличении скорости газа

Описание метода

Ультразвуковые методы широко распространены в технике и медицине. Основное преимущество метода заключается в том, что он бесконтактен и позволяет полностью записать сигнал в реальном времени и потом использовать при обработке сигнала всю информацию об амплитуде и фазе сигнала. Ультразвуковой метод может быть с успехом использован для измерения скорости газовой фазы в потоке (рис. 2). Например, если использовать два пьезокерамических ультразвуковых излучателя, один из которых присоединен к генератору, а второй к осциллографу. Генератор сигналов подает синусоидальный сигнал с частотой f_1 на пьезоэлемент (источник), который создает звуковую волну с частотой, равной частоте приложенного электрического сигнала и резонансной частоте пьезокристалла. Акустическая волна излучается в среду под углом α , после чего рассеивается на фазовых неоднородностях, содержащихся в потоке. Под фазовой неоднородностью в данном случае понимается пузырек с воздухом, всплывающий в измерительном объеме с определенной скоростью V_z .

Рассеянная звуковая волна попадает на приемный пьезоэлемент и преобразуется обратно в синусоидальный электрический сигнал частоты $f_2 = f_1 + \varepsilon$, где ε – сдвиг опорной частоты, вызванный эффектом Доплера за счет рассеяния на движущихся фазовых неоднородностях. На сдвиг частоты влияет только проекция скорости пузырька на направление распространения звуковой волны.

$$f_1 - f_2 = 2f_1 \frac{V_{us}}{c}, \quad (1)$$

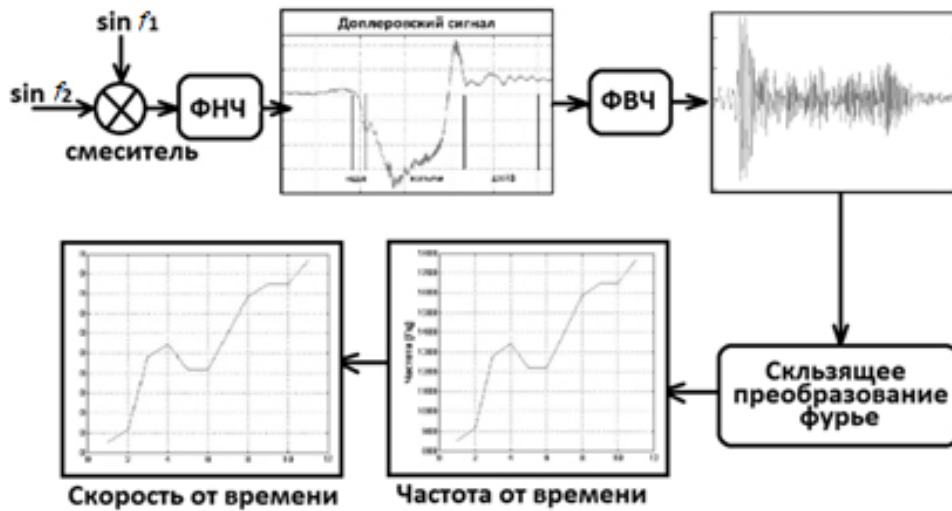


Рис. 2. Иллюстрация применения ультразвукового метода для диагностики скорости газовой фазы

где $V_{us}=V_z \cos(\alpha)$. Измеряется проекция скорости на выбранное направление. Операции умножения записанного сигнала, содержащего доплеровский сдвиг частоты, на опорный сигнал с частотой f_1 и ортогональный сигнал той же частоты (сдвинутый относительно опорного на $\pi/2$):

$$\begin{aligned}
 A \sin(f_1) \cdot B \sin(f_1 + \varepsilon) &= \frac{A \cdot B}{2} (\cos(f_1 + \varepsilon - f_1) - \cos(f_1 + \varepsilon + f_1)) = \\
 &= \frac{A \cdot B}{2} (\cos(\varepsilon) - \cos(2f_1 + \varepsilon)),
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 A \cos(f_1) \cdot B \sin(f_1 + \varepsilon) &= \frac{A \cdot B}{2} (\sin(f_1 + \varepsilon - f_1) - \sin(f_1 + \varepsilon + f_1)) = \\
 &= \frac{A \cdot B}{2} (\sin(\varepsilon) - \sin(2f_1 + \varepsilon)),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где A – амплитуда опорного сигнала; B – амплитуда принимаемого сигнала после рассеяния на воздушном пузыре. Величина B зависит от количества и размера рассеивателей (пузырьков) в потоке и будет использоваться для реализации амплитудно-теневого метода.

Эта операция микширования выполняется для того, чтобы получить низкочастотный сигнал, несущий информацию о доплеровском сдвиге частоты. Фактически, из приведенных выше тригонометрических формул после умножения формируется двухкомпонентный сигнал, составленный из высокочастотной ($2f_1 + \varepsilon$) и низкочастотной (ε) синусоиды. Применив фильтр нижних частот, то есть ослабив высокочастотный сигнал, мы можем выделить нужный нам низкочастотный доплеровский сигнал. Дальнейшая обработка этого сигнала с помощью

скользящего преобразования Фурье позволяет получить зависимость доплеровского сдвига частоты от времени и, соответственно, зависимость скорости пузырька от времени:

$$V_{us}(t) = c \cdot (f_1 - f_2) / 2f_1 = c \cdot \varepsilon(t) / 2f_1 \quad (4)$$

Таким образом, описанный метод позволяет проследить процесс всплытия пузыря, выделить этапы его всплытия и оценить размер пузыря и его положение.

Операции смешения и фильтрации реализованы аппаратно на аналоговых сигналах, а доплеровский сигнал уже был оцифрован (рис. 2). Такой подход имеет ряд недостатков: аппаратно-фиксированная частота формируемого сигнала и параметры фильтрации, неполнота извлеченных данных из приемника и т. д. Поэтому для гибкости и расширения возможностей комплекса, а также для получения большей информации о принимаемом сигнале было решено оцифровать принимаемый высокочастотный сигнал и провести операции микширования и фильтрации программно.

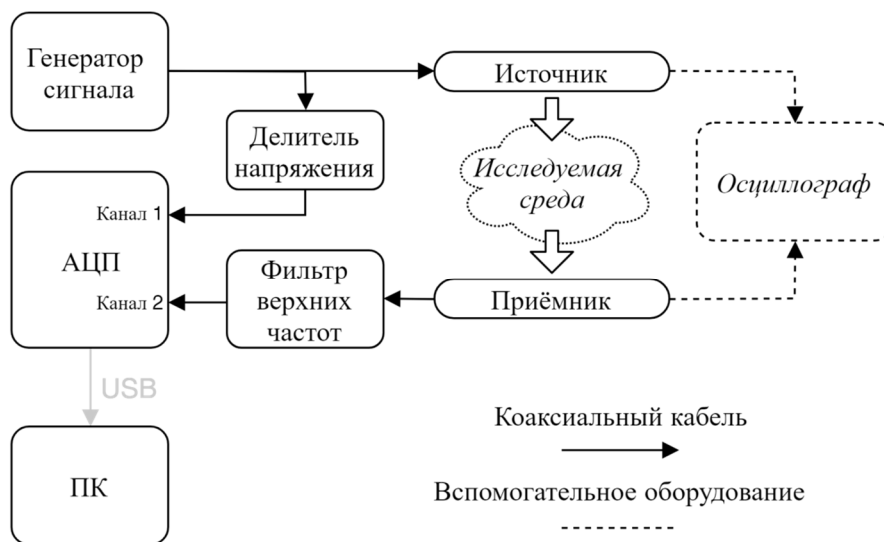


Рис. 2. Схема аппаратного комплекса для реализации предлагаемого метода

В рамках данной работы создан лабораторный образец программно-аппаратного комплекса (ПТК), в котором реализован метод, описанный ранее. Схема комплекса представлена на рис. 2.

Можно выделить следующие функциональные элементы комплекса: аппаратные средства, программное обеспечение, пьезоэлектрические преобразователи (источник и приемник). Аппаратная часть комплекса состоит из следующих элементов: генератор сигналов, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), персональный компьютер, соединительные провода. Для возбуждения колебаний пьезоэлемента (источника) необходим высокочастотный генератор с высокой стабильностью частоты. Требование высокой стабильности частоты обусловлено следующими факторами: стабильный сигнал позволяет более точно

определять доплеровский сдвиг частоты, а, следовательно, и скорость пузырька; обработка сигналов значительно упрощается; стабильность сигнала позволяет получить экспериментальную статистику. Блок управления и генератор марки Rigol DG1062Z. С помощью коаксиального кабеля были соединены пьезоэлемент (источник) и сигнальный выход генератора. Приемный пьезоэлемент соединен коаксиальным кабелем с 14-разрядным АЦП L-Card E20-10-D-1 с типовым отношением сигнал/шум 73 дБ. Этот АЦП не имеет входных фильтров, что необходимо для оцифровки высокочастотных сигналов. Используемая частота дискретизации составляет 1 МГц, а частота сигнала генератора – 4,02 МГц. Ниже приводится объяснение такого выбора частот.

Оцифровывание сигнала производилось на частоте 1 МГц. Доплеровский сдвиг частоты в предлагаемом способе составляет не более 0,01 МГц. Спектр «полезных» частот принимаемого сигнала лежит в диапазоне 4,01-4,03 МГц, а после оцифровки с учетом эффекта алиасинга – в диапазоне 0,01-0,03 МГц. Экспериментальные исследования с частотой дискретизации 10 МГц дали такие же результаты (как и при частоте 1 МГц) и подтвердили работоспособность и правильность вышеописанной методики оцифровки на частоте 1 МГц. Этот метод называется полосовой выборкой и имеет несколько практических применений. Данные с АЦП передаются по кабелю USB на персональный компьютер (Intel Core i5, ОС Windows). Обработка данных (рис. 3), поступающих с АЦП, осуществлялась с помощью программы, разработанной в пакете Matlab. Входными данными в программу является массив $t \cdot 10^6$ ($f_{ADC} \cdot t = 1 \text{ [МГц]} \cdot t \text{ [с]} = t \cdot 10^6$) значений амплитуды колебаний приемного пьезопреобразователя, где t – время записи (сбора данных).

Результаты

Сначала программа рисует график сигнала с приемного пьезоэлемента. Этот сигнал позволяет зафиксировать момент подъема пузырька и оценить его размер (амплитудно-теневой метод). Далее выполняется смещение и фильтрация нижних частот. Фильтрация реализована с использованием алгоритма скользящего среднего с окном усреднения в 300 точек. Процедура фильтрации применяется к массиву данных дважды последовательно. В результате получается так называемый доплеровский сигнал (рис. 5). Доплеровский сигнал принимает отличное от нуля значение только при наличии движения в измеряемом объеме, что подтверждает физическую картину метода. По этому сигналу можно выделить этапы всплытия пузырька (рис. 6). Доплеровский сигнал содержит низкочастотную составляющую из-за изменения амплитуды принимаемого сигнала. Фильтр высоких частот также реализован с использованием алгоритма скользящего среднего с окном усреднения 1500 точек. Результирующий сглаженный сигнал вычитается из исходного сигнала, в результате чего выделяется низкочастотная составляющая. Наблюдается увеличение доплеровского сдвига частоты и скорости пузырька со временем, что естественно для плавающего в жидкости пузырька. Таким образом, программная часть описанного выше комплекса позволяет отслеживать динамику всплытия пузырька.

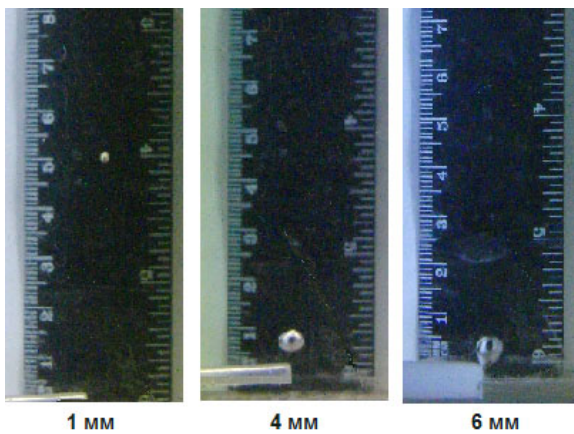


Рис. 3. Кадры видеосъемки всплытия пузырей различного диаметра в воде

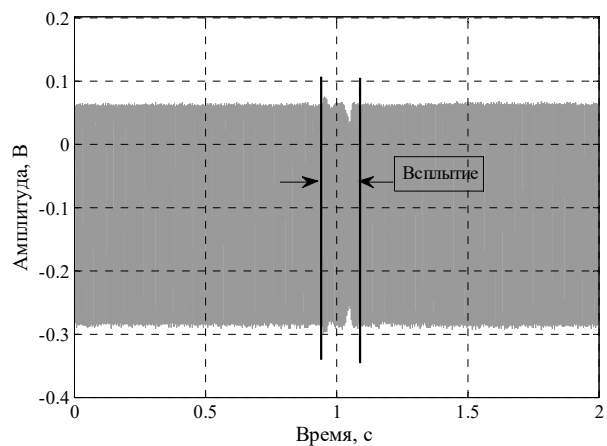


Рис. 4. Доплеровский сигнал, увеличенный

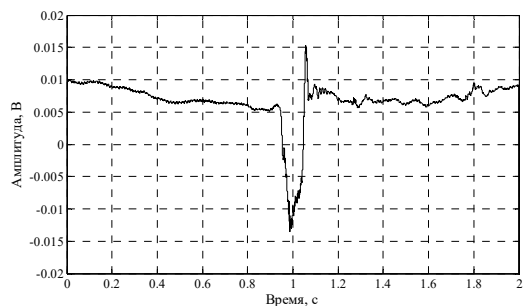


Рис. 5. Доплеровский сигнал без низкочастотной составляющей

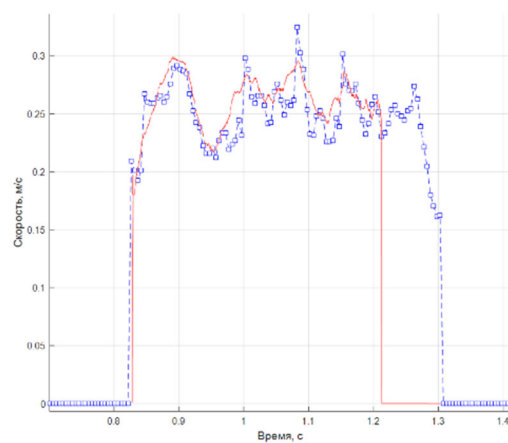


Рис. 6. Показания комплекса и верификация видеосъемкой, пузырь 6 мм в воде

Следующим этапом работы была попытка применить указанный метод для классификации режимов двухфазного потока. Использован канал из оргстекла с поперечным сечением в виде квадрата 16x16 мм (рис. 7, 8). Реализована возможность добавлять газовую фазу в поток (рис. 9). При прохождении пузырьков в канале происходит увеличение амплитуды сигнала (рис. 10). А при прохождении большой порции газа (рис. 11) и образовании снарядного режима течения происходит перекрытие сигнала между источником и приемником ультразвукового излучения, и происходит просадка амплитуды регистрируемого излучения до нуля (рис. 12). Амплитуда и форма сигнала несут в себе информацию о режиме течения в канале. Анализируя их можно классифицировать режимы течения в канале. А измеряя частоту доплеровского сдвига, вызванного движением газовой фазы, возможно определить скорость газовой фазы, как указано выше.

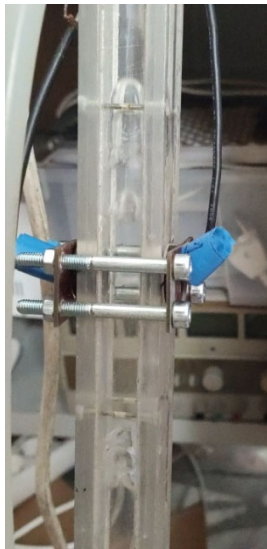


Рис. 7. Фотография канала для формирования течения

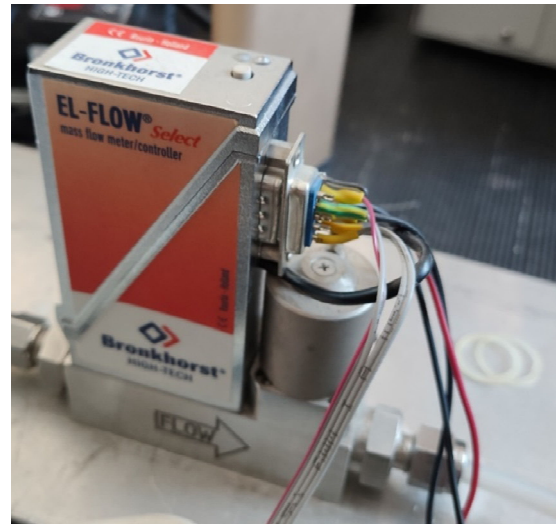


Рис. 8. Контролер течения El-flow фирмы Bronkhorst



Рис. 9. Осциллограмма сигнала в отсутствие газовой фазы в канале

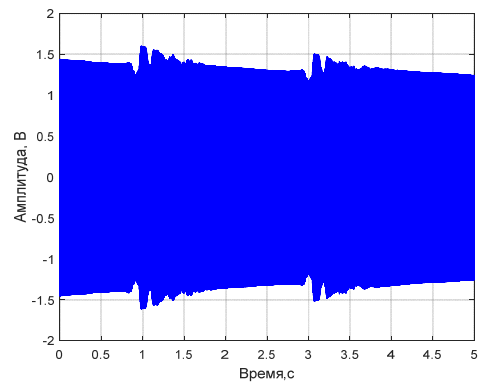


Рис. 10. Сигнал с приемника. На временных промежутках 0,8–1,5 и 2,8–3,5 секунд видны амплитудные скачки, вызванные всплывающими пузырями



Рис. 11. Осциллограмма при прохождении крупных пузырей в канале



Рис. 12. Осциллограмма с приемника при прохождении газовых снарядов Тейлора в канале

Заключение

Предложен комплексный метод ультразвуковой диагностики двухфазных течений в двухфазной среде. Метод позволяет измерять динамические и структурные характеристики плавающей неоднородности (газового пузыря). Разработан лабораторный образец программно-аппаратного комплекса, реализующего предлагаемый метод. Комплекс прост и гибок в использовании, то есть позволяет проводить измерения в различных конфигурациях. На основе пьезоэлектрических преобразователей разработана и внедрена серия ультразвуковых погружных датчиков, позволяющих работать в жидкости и жидком металле. Разработанный метод также позволяет классифицировать режимы течения в канале.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meledin V.G. Informatics of optoelectronic measurements: science and innovative industrial technologies / Novosibirsk: Publishing house of IT SB RAS, 2008. - 75 p.
2. Akatov A.A., Koryakovskiy Yu. S. Future of nuclear power engineering. Fast reactors. Atomic energy information centers. Moscow, 2012 - 36 p.
3. Sahai and Guthrie. Hydrodynamics of gas stirred melts: Part I and II. Metallurgical and Materials Transactions B. - 1982.
4. K. V. Santhosh, B. K. Roy. An Intelligent Flow Measurement Technique using Ultrasonic Flow Meter with Optimized Neural Network // International Journal of Control and Automation. – Vol. 5, № 4, December. – 2012.
5. Andruszkiewicz et al. Ultrasonic measurements of flow in two-phase liquid gas systems I – III. Chemical and Process Engineering. – 2008.

© П. Д. Лобанов, Н. А. Прибатурин, И. К. Кабардин, К. С. Зубанов, 2023