

=====

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

=====

УДК 01–311

ЛАЗЕРНАЯ ДОПЛЕР-АНЕМОМЕТРИЯ ДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ
ДВУХ ЖИДКОСТЕЙ С БЛИЗКИМИ ПЛОТНОСТЯМИ

© 2024 г. Т. Р. Нигматулин

Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, Москва, Россия
e-mail: nigmat@gmail.com

Поступила в редакцию 16.03.2024 г.
После доработки 10.06.2024 г.
Принята к публикации 15.06.2024 г.

Лазер-Доплер-анемометром были измерены профили скоростей и объемной концентрации для вертикально восходящего двухфазного жидко-жидкостного капельного потока в цилиндрической трубе, у которого разность плотностей фаз относительно мала. Такой режим моделирует течение двухфазной газожидкостной смеси в невесомости. Экспериментально измерена малая скорость скольжения фаз. Разработаны новые методы использования лазер-Доплер-анемометра для измерения скорости и объемной концентрации фаз для дисперсного двухфазного потока.

Ключевые слова: лазер-Доплер-анемометр, двухфазный поток, капельный поток, невесомость

DOI: 10.31857/S0235711924050084, **EDN:** NTRYGD

Исследование двухфазной смеси, которая состоит из двух жидкостей, весьма важная проблема во многих технологиях [1]. Кроме того, двухжидкостные потоки (жидкость–капли), когда плотности фаз близки между собой, можно использовать для моделирования парожидкостного потока при малой гравитации. **Цель** исследования — разработка экспериментального метода высокой точности для измерения гидродинамических параметров.

В эксперименте в качестве несущей жидкости использовалась водопроводная вода (ρ_w), а в качестве капель — минеральное масло, плотность которого ρ_0 была чуть меньше плотности воды (табл. 1).

Таблица 1.

Вещество	Плотность, кг/м ³	Вязкость для $T = 17^\circ\text{C}$ кг/(м·с)	Коэффициент преломления
Минеральное масло	874	0.25	1.47
Вода	1000	0.0014	1.334

Минеральное масло/вода коэффициент натяжения межфазной поверхности:
 $\sigma (17^\circ\text{C}) = 50 \text{ мН/м}$

Из равенства архимедовых сил, в этой модели (гравитация определяется ускорением $g = 9.81 \text{ м/с}^2$) с аналогичной для газо- или парожидкостного потока (с плотностями фаз ρ_L и ρ_G) в космической лаборатории с массовыми силами, определяемыми ускорением g' , и объемом дисперсных частиц V_d получим равенство

$$g V_d (\rho_w - \rho_o) = g' V_d (\rho_L - \rho_G).$$

Таким образом, эксперимент позволяет моделировать течение газожидкостного дисперсного потока в космосе (малые величины g') в земных условиях, но с малой разницей плотностей фаз

$$\frac{g}{g'} = \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_w - \rho_o}.$$

Скорость распределения капель масла в водном потоке измерялась лазерным Доплер-анемометром (ЛДА), который является современным прибором, используемым в экспериментальных измерениях гидродинамики многофазных сред. Преимущество ЛДА-системы состоит в том, что метод измерения бесконтактный, т.е. исследуемые потоки при измерениях остаются невозмущенными, а контрольный (измерительный) объем имеет небольшие размеры. Все компоненты этой измерительной системы, за исключением лазера, изготовлены компанией DANTEC Electronics [2, 3].

Принцип работы ЛДА-систем заключается в том, что при пересечении в одной точке двух лазерных лучей с одинаковыми параметрами, образуется дифракционная решетка. Расстояние между линиями решетки зависит от характеристик лазера и угла пересечения лазерных лучей. Когда частица, находящаяся в потоке воды, проходит через точку пересечения лазерных лучей, то от каждой линии дифракционной решетки она отражает свет, который обнаруживается фотоумножителем, а он в свою очередь порождает электрический сигнал. Этот сигнал обрабатывается, проходя через микропроцессор. Вычисляя расстояние между линиями дифракционной решетки и зная частоту отражения, т.е. время прохождения частицы от одной линии дифракционной решетки к другой, находится скорость частицы, проходящей через контрольный объем. Частоту и расстояние между линиями дифракционной решетки можно найти из следующих уравнений:

$$f_d = \frac{2u_x}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad d_f = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{1}{2}\theta\right)},$$

где u_x — измеряемая скорость материальной частицы вдоль оси x ; θ — угол между лазерными лучами; λ — длина волны лазерных лучей.

Перед началом измерений проводилась калибровка ЛДА-системы. С этой целью были разработаны новые методы горизонтального и вертикального калибрования: ЛДА-сенсор и тестовая секция трубы погружались в водный бак, а лазерные лучи проходили через воду и пересекались в испытательной секции (рис. 1). Тестовая секция трубы изготавливалась из оптически прозрачного тефлона (fluorinated ethylene propylene (FER)). Особенность тефлона заключается в том, что он имеет такой же коэффициент преломления света, как и вода, т.е. $n = 1.334$. Используя тефлон в качестве стенок трубы на испытательном участке, мы избежали необходимых дополнительных поправок, связанных с оптикой материала и кривизной цилиндрической трубы. После калибровки и проверки точности аппаратуры были проведены измерения скоростей для дисперсного (масляные капли в воде) двухфазного потока.

Для начала контрольный объем был направлен в центр тестовой секции, через которую текла только вода (без капель масла). Регулируя интенсивность лазерного луча и напряжение, подаваемое на фотоумножитель, добиваемся, чтобы частота получаемых доплеровских сигналов была очень мала, при хорошем качестве сигнала. Доплеровский сигнал получался благодаря тому, что в водопроводной воде всегда имеются маленькие частички-метки (очень мелкие пузырьки воздуха и примесные твердые частички). Размер этих частичек во много раз меньше, чем дисперсные частицы (капли масла), исследуемого дисперсного потока. После этого напряжение, подаваемое на фотоумножители, уменьшалось до тех пор, пока доплеровский сигнал исчезал почти полностью, и частота доплеровского сигнала была всего порядка 0.01 Гц.

Затем впрыскивалось масло в поток воды, и создавался исследуемый дисперсный поток. Частота доплеровских сигналов сразу возрастала до 1–2 Гц, так как размер масляных капель во много раз больше, чем размер частичек-меток, находящихся в воде, и отражение света от сферических масляных капель очень сильное.

Таким методом ЛДА-система использовалась для измерения скорости только масляных капель в двухфазном потоке. Для измерения скорости несущей фазы, т.е. воды, напряжение, подаваемое на фотоумножители, было увеличено, чтобы увеличить их чувствительность и иметь возможность измерять так же скорость частичек-меток, находящихся в воде. Однако частота измерений возросла всего на 30 процентов, и соответственно мы не могли разделить измерения, относящиеся к каплям масла и частичкам, находящихся в воде и имеющих скорость воды из-за их небольшого размера. Для решения этой проблемы в воду был добавлен порошок оксида титана [4, 5]. Этот порошок обладает высоким коэффициентом отражения, а размер частичек этого порошка всего 2–3 микрона, что очень хорошо для измерений с ЛДА [6]. Чтобы минимизировать влияние порошка на двухфазный поток его массовое и объемное содержания были очень малы (всего 0.1 г порошка на 200 л воды) [7, 8]. Для измерений скорости потока воды без масла, но с титановым порошком и с той же мощностью лазера и с тем же напряжением, подаваемым на фотоумножитель, что и при измерениях скорости масляных капель, частота измерений была в пределах 65–100 Гц. Эта частота значительно отличалась от частоты измерений для масляных капель.

Таким образом, при добавлении титанового порошка в двухфазный поток, частота измерений была также в пределах 65–100 Гц. Этим методом можно мерить и скорость воды, делая две серии измерений.

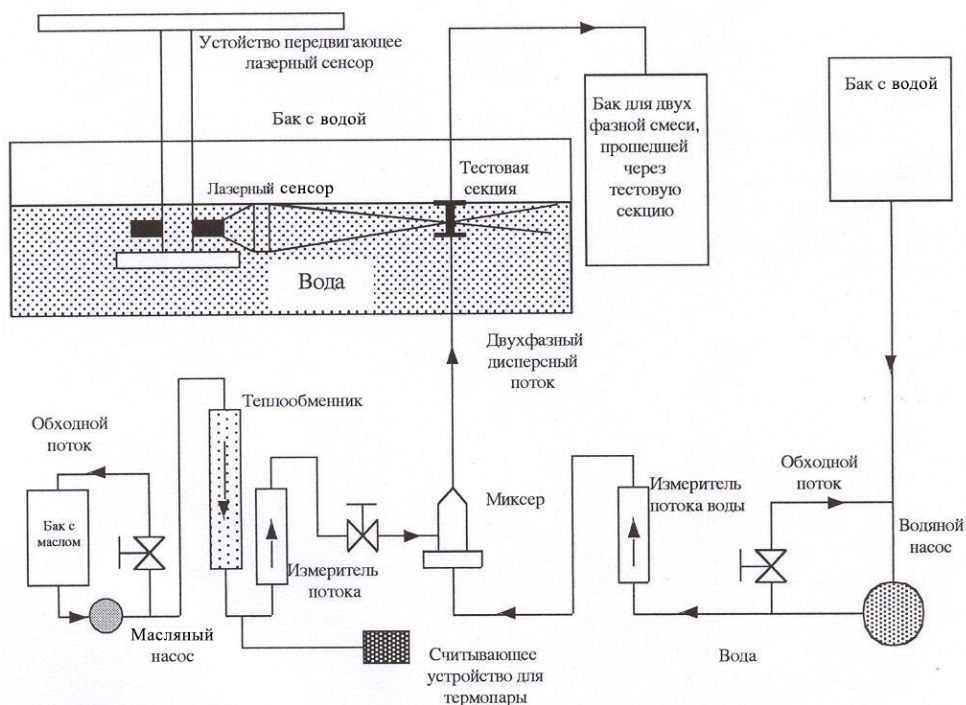


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерений ЛДА-системой.

На рис. 2 и 3 представлены результаты эксперимента для дисперсного потока в вертикальной трубе с диаметром 30.6 мм. Диаметр масляных капель D_d измерялся фотографическим методом.

Распределение объемной концентрации дисперсной фазы в потоке по радиальной координате r с помощью измерений тем же лазерным доплер-анемометром

$$\alpha_d(r) = \frac{Nl}{u_d(r)\Delta t} = \frac{\pi}{2} \frac{NR_d}{u_d(r)\Delta t},$$

где l — длина хорды пробега масляной капли через измерительный контрольный объем; R_d — радиус масляной капли; $u_d(r)$ — продольная локальная скорость масляных капель в точке с радиальной координатой r ; Δt — промежуток времени, за который было измерено N масляных капель в точке с радиальной координатой r .

Из полученных результатов (рис. 3) видно, что объемная концентрация дисперсной фазы уменьшается в сторону стенки трубы. Аналогичная тенденция была обнаружена для двухфазного дисперсного потока с твердыми частичками и с нулевой разницей плотностей фаз Alajbegovic [1].

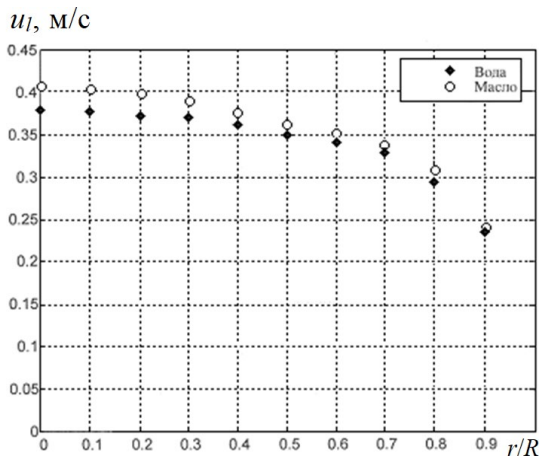


Рис. 2. Профиль скоростей воды и масляных капель $Q_w = 13.23$ л/мин, $(Re = 7.000)$, $Q_0 = 0.150$ л/мин, $D_d = 2.3$ мм.

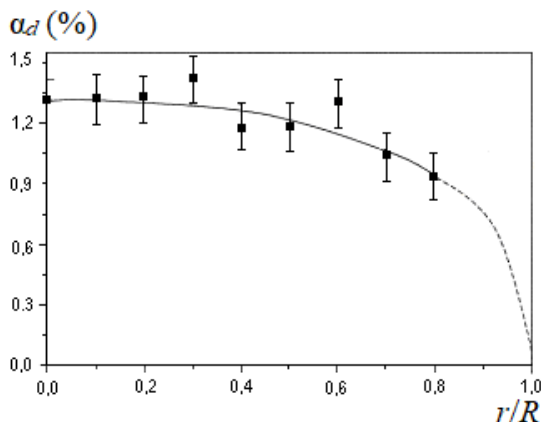


Рис. 3. Распределение объемной концентрации α_d (%).

Вывод. Измерения были проделаны с высокой точностью, чтобы погрешности измерений скоростей фаз были много меньшие, чем величина скорости относительного движения (проскальзывания) фаз, которая в рассматриваемых случаях была очень мала. Надо отметить, что данные по распределению объемной концентрации очень важны при вычислении удельной плотности межфазной поверхности ($s_{12} = dS_{12}/dV$, где dS_{12} является межфазной площадью в конечном объеме dV) и при исследовании межфазных переходов [9].

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Научного центра нелинейной волновой механики и технологии РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alajbegovic A., Assad A., Bonetto F., Lahey R. T.* Phase Distribution and Turbulence Structure for Solid/Fluid Upflow in a Pipe // *Int. J. Multiphase Flow*. 1994. V. 20 (3). P. 453.
2. DANTEC "User's Manual", Scientific Research Equipment Division // Dantec Information Department, 1989.
3. DANTEC "Personal Communication" Scientific Research Equipment Division, New Jersey, 1998.
4. *Durst F., Zare M.* Laser-Doppler Measurements in Two-Phase Flows. The Accuracy of Flow Measurement by Laser-Doppler Methods // *LDA-Symp.*, Copenhagen, 1975. P. 403.
5. *Durst F., Melling A., Whitelaw J. H.* Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry. London: Academic Press, 1981.
6. *Durrani T. S., Grated C. A.* Laser Systems in Flow Measurement. New York: Plenum Press, 1977. 289 p.
7. *Nigmatulin T. R., Bonetto F. J., Larreteguy A. E., Lahey R. T. Jr., Mcquillen J. B.* An experimental Study of Dispersed Liquid/Liquid Two-Phase Upflow in a Pipe // *Chem. Eng. Comm.* 2000. V. 182. P. 121.
8. Spectra-Physics, "Instruction Manual", Laser Product Division, Rev. B, 1989.
9. *Boiko V. M., Nesterov A. Yu., Poplavski S. V.* Liquid atomization in a high-speed coaxial gas jet. Thermophysics and Aeromechanics // *Liquid Atomization in a High-speed Coaxial Gas Jet*. 2019. V. 26. P. 385.