ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА

В. С. Аксенов[1], А. И. Ботячкова[2], Г. Г. Карпинский[2], С. А. Полихов[3], С. М. Фролов[1], R. F. Schulz[4]

[1]ИХФ РАН
г. Москва, Россия
[2]НИЯУ-МИФИ
г. Москва, Россия
[3]ООО «Научно-исследовательский Центр Сименс»
г. Москва, Россия
[4]Healthcare, Siemens AG
Erlangen, Germany

В современной физике горения и взрыва изучению многофазных течений уделяется большое внимание. Такие течения — основа рабочего процесса подавляющего большинства энергопреобразующих устройств: ракетных, воздушно-реактивных и поршневых двигателей, горелочных и топочных агрегатов, устройств нанесения покрытий и др. Кроме того, многофазными являются течения в нефтяных и газовых скважинах, течения теплоносителя в энергетических установках, течения в пневмотранспортных магистралях и течения с кавитацией при работе насосных агрегатов и гребных винтов.

Для изучения многофазных течений и экспериментального определения их характеристик используются различные измерительные методы как с возмущением объекта исследования, так и без возмущения. К наиболее распространенным методам невозмущающих измерений относятся оптические методы, в частности рентгеновская визуализация многофазного течения. Учитывая бурное развитие методов генерации и регистрации рентгеновского излучения, применение последних достижений в этой области науки и техники

позволяет надеяться на возможность углубления наших знаний о физико-химических явлениях в многофазных течениях и значительного повышения точности измерений важнейших характеристик таких течений.

В 2011 г. в ИХФ РАН в рамках программы долгосрочного сотрудничества с компанией Siemens прошли испытания уникального рентгеновского визуализирующего устройства (РВУ) для диагностики многофазного течения. На первом этапе совместной работы решалась задача об одновременном измерении средней скорости и фазового состава многофазного течения в вертикальной трубе в реальном масштабе времени.

Для создания многофазного течения был спроектирован и изготовлен лабораторный многофазный гидродинамический контур. Через контур можно прокачивать многофазные смеси сложного компонентного состава, например воду, жидкие углеводороды разной плотности (нефть, масла, дизельное топливо и т. д.), порошки (песок и др.) и газ (воздух и др.). В данной работе исследовались трехкомпонентные смеси типа «вода – дизельное топливо (ДТ) – воздух».

Основные системы гидродинамического контура — система смешения, циркуляции и рекуперации (СЦР) многофазной смеси, система управления и система сбора данных.

Система СЦР многофазной смеси состояла из шести герметичных напорных емкостей суммарным объемом 3 м^3, магистралей жидких, газовых и порошковых компонентов, смесителя, приемной емкости, гравидинамического сепаратора и системы создания избыточного рабочего давления в емкостях. Все узлы и детали системы СЦР сделаны из высококачественной нержавеющей стали, что гарантирует долгий срок и надежность эксплуатации установки.

Конструктивные особенности контура позволяли варьировать содержание любого из компонентов многофазного потока в рабочей секции в пределах от 0 до 100 %(об.) суммарного потока. Максимальный возможный расход жидких компонентов — 20 м^3/ч, воздуха — 120 м^3/ч. Кроме того, контур позволял создавать квазистационарные потоки в импульсном режиме длительностью около 1 мин при максимальных расходах компонентов рабочего тела.

Для прямого (контрольного) измерения расходов воды и жидких углеводородов использовали импульсные расходомеры с овальными шестернями. В качестве расходомера воздуха использовали термо-

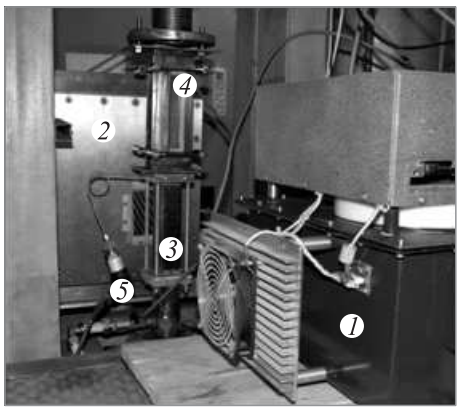
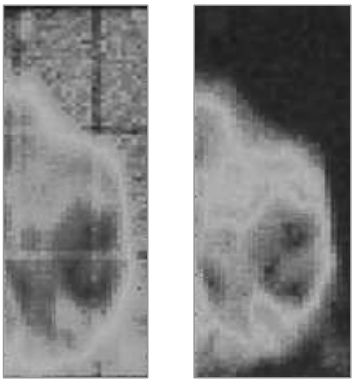


Рис. 1 Фотография РВУ: *1* — генератор; *2* — матричный детектор; *3* — карбоновая рабочая секция контура квадратного сечения 40×40 мм; *4* — секция для оптического наблюдения; *5* — датчик давления

анемометрический датчик. Данные с расходомеров и датчика давления, установленного в рабочей секции контура, регистрировались с частотой 1 кГц.

Рентгеновское визуализирующее устройство состояло из рентгеновского генератора и матричного рентгеновского детектора (рис. 1). Используемый в экспериментах источник рентгеновского излучения позволял получать рентгеновские импульсы произвольной длительности с напряжением до 100 кВ (ток трубки до 30 мА), а также создавать ступенчатые и наклонные импульсы. Матрица рентгеновского детектора имела размер 96×64 точки, причем физический размер каждой точки не превышал $1{,}2 \times 1{,}2$ мм. Время экспозиции одного кадра — от 217 мкс. Разрядность детектора — 20 бит. Включение детектора происходило по сигналу синхронизации от источника рентгеновского излучения. Важная особенность детектора — устойчивость его показаний к изменению внешних условий, таких как температура, влажность воздуха и т. д. Матрица детектора представляла собой модульный набор и могла быть расширена до любых необходимых размеров.

На рис. 2 представлены примеры изображений многофазного потока с детектора до (рис. 2, *а*) и после (рис. 2, *б*) шумоподавления



(*а*) (*б*)

Рис. 2 Изображение воздушного снаряда в многофазном течении «вода–ДТ–воздух» до (*а*) и после (*б*) шумоподавления и коррекции на опорный сигнал. Напряжение трубки 60 кВ, выдержка 434 мкс (направление течения — снизу вверх)

и коррекции на опорный сигнал в многофазном течении «вода–ДТ–воздух».

В опытах одновременно измеряли среднюю скорость многофазного течения и расход смеси (с помощью РВУ), а также истинный расход (с помощью расходомеров).

Скорость течения определяли методом корреляционного анализа. Для каждого эксперимента получали последовательность из 2000 рентгеновских изображений потока. Для каждой пары кадров (под номерами 1–6, 2–7, 3–8 и т. д.) с помощью корреляционной функции вычисляли сдвиг в пикселях. Скорость течения определяли умножением среднего сдвига в пикселях на масштабирующий коэффициент с учетом частоты кадров.

Методика определения состава двухфазной смеси основана на применении закона поглощения Ламберта–Бэра. Для определения состава решали систему уравнений:

$$I_1 = I_{10} e^{-\alpha_{w1} x_w - \alpha_{o1} x_o} ;$$
$$I_{1o} = I_{10} e^{-\alpha_{o1} d_0} ;$$
$$I_{1w} = I_{10} e^{-\alpha_{w1} d_0} ;$$
$$d_0 = x_w + x_o ,$$

где I_1 — экспериментальный сигнал; I_{10} — калибровочный сигнал по воздуху; α_{w1} — коэффициент поглощения для воды; α_{o1} — коэффициент поглощения для ДТ или воздуха; I_{1o} — калибровочный сигнал по ДТ или воздуху; I_{1w} — калибровочный сигнал по воде; x_w — толщина слоя воды в рабочей секции; x_o — толщина слоя ДТ или воздуха в рабочей секции; d_0 — толщина рабочей секции.

Таблица 1 Результаты определения средней скорости многофазного потока

A, м^3/ч	W, м^3/ч	V, м/с	$V_р$, м/с	E_V, %	$A_с$, %	$A_{ср}$, %	$W_с$, %	$W_{ср}$, %	$E_с$, %	Режим
2,9	6,8	1,7	1,6	5	30	22	70	78	8	
2,9	6,6	1,7	1,8	6	30	21	70	79	9	I
2,9	6,6	1,6	1,8	7	30	21	70	79	9	
2,6	10,2	2,2	2,1	5	20	16	80	84	4	
2,5	13,0	2,7	2,9	8	16	12	84	88	4	III
2,1	15,7	3,1	3,3	7	12	9	88	91	3	
10,4	15,2	4,5	4,7	6	41	38	59	62	3	
11,1	12,7	4,1	4,0	2	47	42	53	58	5	II
12,7	8,4	3,7	3,9	6	60	57	40	43	3	
20,5	10,6	5,4	5,3	2	66	59	34	41	7	
17,9	13,8	5,5	5,3	4	56	52	44	48	4	IV
18,1	13,8	5,5	5,4	3	57	53	43	47	4	

Обозначения: A — расход воздуха; W — расход воды; V — истинная скорость течения; $V_р$ — расчетная скорость течения; E_V — погрешность измерения скорости; $A_с$ — истинное содержание воздуха в смеси; $A_{ср}$ — расчетное содержание воздуха в смеси; $W_с$ — содержание воды в смеси, $W_{ср}$ — расчетное содержание воды в смеси, $E_с$ — погрешность измерения состава.

Проверочные опыты выполнялись для двухфазных смесей «вода–воздух» и «вода–ДТ».

Для смесей «вода–воздух» объемный расход компонентов варьировали в пределах от 3 до 30 м^3/ч для воздуха и от 2 до 16 м^3/ч для воды. В ходе экспериментов выявлено 4 различных режима течения, зависящих от объемных расходов воды и воздуха: от снарядного и кольцевого до дисперсно-кольцевого и дисперсного. Результаты измерения скорости в этих режимах течения (режимы I–IV) приведены в табл. 1. Следует отметить, что точность определения скорости существенным образом зависела от режима течения. Тем не менее, средняя ошибка определения скорости течения для всех проведенных опытов составила 7%–8%.

Для смесей «вода–ДТ» расход компонентов варьировали от 3 до 10 м^3/ч для ДТ и от 2 до 13 м^3/ч для воды. Для всех составов смесей «вода–ДТ» режим течения был одинаковым.

Погрешность определения компонентного состава течения зависела от режима течения многофазной смеси, однако она не превышала 9% для всех проведенных экспериментов.

Важнейшее достоинство используемой методики измерений — возможность определять характеристики течения с частотой опроса до 4,5 кГц.

Таким образом, в 2011 г. нами проведена работа по проектированию, изготовлению и наладке многофазного гидродинамического контура и систем регистрации, а также проведены проверочные эксперименты с использованием РВУ и параллельного контроля точности расхода каждого компонента многофазного потока с помощью прецизионных расходомеров. Первичные экспериментальные исследования показали, что РВУ — надежный и точный инструмент для изучения характеристик многофазных течений. В дальнейшем планируется проведение систематических экспериментов по определению фазового состава и скорости многофазного течения в реальном масштабе времени, используя разные смеси. Полученные данные будут использованы для проверки и совершенствования континуальных и дискретных моделей механики многофазных сред. В перспективе планируются эксперименты с многофазными потоками с фазовыми переходами жидкость–пар и с кавитацией, а также эксперименты по смешению топливных компонентов в сверхкритической области состояний.