

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ ПРОВОДИМОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ СВЕРХЗВУКОВОЙ ПАРОВОЙ СТРУЕЙ И ВОДОЙ

© 2021 г. Afrasyab Khan^{a,*}, Khairuddin Sanaullah^b, Е. К. Спиридонов^a,
А. В. Подзерко^a, Д. Ф. Хабарова^a, Ahmad Hasan Ali^a, Ahmed Salam Farooqi^{c, d},
Mohammed Zwawi^e, Mohammed Algarni^e, Bassem F. Felemban^f,
Ali Bahadar^g, Atta Ullah^h, Bawadi Abdullahⁱ

^a Политехнический институт Южно-Уральского государственного университета
(национального исследовательского университета)
Россия, 454080, Челябинск, просп. Ленина, 76

^b Department for Management of Science and Technology Development,
Faculty of Applied Sciences, Ton DucThang University, Ho Chi Minh City, Vietnam

^c Department of Chemical Engineering, University Technology Petronas, Bandar Seri Iskandar,
32610, Perak, Malaysia

^d Department of Chemical Engineering, Wah Engineering College, University of Wah,
WahCantt, 47040 Punjab, Pakistan

^e Department of Mechanical Engineering, King Abdulaziz University,
Rabigh 21911, Saudi Arabia

^f Mechanical Engineering Department, Taif University,
Taif 26571, Saudi Arabia

^g Department of Chemical and Materials Engineering, King Abdulaziz University,
Rabigh 21911, Saudi Arabia

^h Department of Chemical Engineering, Pakistan Institute of Engineering & Applied Sciences (PIEAS),
Nilor, Islamabad, Pakistan

ⁱ Chemical Engineering Department, Universiti Teknologi PETRONAS,
32610 Seri Iskandar, Malaysia, Centre of Contaminant Control and Utilization (CenCoU),
Institute of Contaminant Management for Oil and Gas, Universiti Teknologi PETRONAS,
32610 Seri Iskandar, Malaysia

*e-mail: khana@susu.ru, drafrasyabkhan7@gmail.com

Поступила в редакцию 03.12.2020 г.

После доработки 11.03.2021 г.

Принята к публикации 15.03.2021 г.

Работа представляет собой попытку описать парожидкостный поток с фазовыми переходами, что может помочь в определении передачи массы, количества движения и энергии в межфазной области, содержащей пар и воду. В этом исследовании описывается разработка сенсорной электродной системы измерения паровой фракции, основанной на электродах на основе переменного тока, называемой системой томографии электрического сопротивления (ERT – Electrical Resistance Tomography). Система на основе ERT была применена, чтобы выявить процессы, связанные со сверхзвуковой закачкой пара в объем воды. Система сбора данных на основе ERT применялась в течение заданного интервала времени, а полученные данные обрабатывались с использованием бесплатного кода, известного как EIDORS. Изображения, полученные таким образом с помощью EIDORS, дали плоскую картину сверхзвуковой струи пара в окружающей воде. Изображения представляют собой хорошо видимые границы между фазами пара и воды, а также турбулентную зону между ними. Было обнаружено, что при повышении температуры на 30–60°C площадь паровой струи увеличивается с 46.51 до 65.40% при давлении пара на входе 3.0 бар.

1. ВВЕДЕНИЕ

Прямая контактная конденсация (DCC – direct contact condensation) с использованием пара и воды применима в ряде отраслей промышленности, включая атомные и тепловые электростанции, а также некоторые перерабатывающие и металлургические отрасли. Основное преимущество DCC заключается в превосходной теплопередаче на границе раздела пар–жидкость [1]. После нагнетания пара в сосуд, заполненный переохлажденной водой, происходит конденсация пара, которая, в зависимости от условий эксплуатации, может принимать три режима потока – пузырьковый, пульсирующий или струйный [2].

DCC до сих пор представляет интерес, о чем свидетельствуют предыдущие исследования, среди которых можно упомянуть, например, Kerney [3] и Wiemer [4]. Они провели эксперименты и сообщили о нормализованном проникновении струи пара, что было подтверждено теоретически. При этом изучалось влияние температуры воды на размеры межфазной области между паром и водой. Их результаты показали, что геометрия межфазной зоны в значительной степени зависит от температуры.

Для объяснения явления конденсации была применена теоретическая модель [5], которая включала описание распределения давления и температуры внутри струи пара и в окружающей ее потоке. Большая часть работы, выполненной до настоящего времени, в основном была сосредоточена на режимах течения, которые преобладают в факеле струи пара и прилегающих областях, а также на режимах тепло- и массопереноса. Однако не было исследования, в котором сообщалось бы о подробном пространственном распределении температуры, чтобы показать происхождение гидродинамической неустойчивости в струе пара и ее взаимодействия с водой в качестве окружающей жидкости. Некоторые из наших исследований пролили свет на этот вопрос [6–8], но все же межфазное поведение и его тенденции необходимо исследовать с использованием более сложных методов, таких как ERT (ERT – Electrical Resistance Tomography), что и описано в данной работе.

Взаимодействие между паром и водой характеризуется образованием границы раздела между двумя фазами. Природа взаимодействия очень нестабильна, при этом процессы передачи массы, импульса и энергии зависят от условий взаимодействия фаз, и они происходят в зоне контакта. Получение характеристик процесса межфазного взаимодействия экспериментальными, теоретическими и/или вычислительными способами затруднено из-за его неустойчивого характера. Кроме того, передача массы, количества движения и

тепла через изменчивую границу раздела усложняет это явление.

Как описано ранее, более интенсивные исследования межфазного явления пар–вода имеют большое значение из-за генерации неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (КГ) [6] и крупномасштабной конденсации межфазного пара, приводящей к детонации воды в трубопроводе атомной электростанции [9], что может отрицательно сказаться на безопасности и целостности установок. Неустойчивости КГ ответственны за дестабилизацию границы раздела между паром и водой в DCC [10]. Они сохраняются в течение короткого периода времени и демпфируются из-за температуры и вязкости воды, окружающей струю пара [7, 11].

Такие неустойчивости образуются на границе раздела и распространяются дальше от границы раздела в сторону внешнего направления. Предполагается, что граница раздела между паром и водой имеет нулевую толщину [9]. Другие исследователи [12–16], которые предоставили важную информацию о межфазной неустойчивости конденсируемых и неконденсируемых флюидов, подчеркивали необходимость наличия точной информации о канале, где формируется многофазный поток, и единственной наиболее важной переменной, которая контролирует явления взаимодействия – объемное парообразование. Таким образом, любая ошибка в измеренном значении паросодержащей доли дает неправильное понимание межфазных явлений, что может привести к ошибочным результатам оценки процессов переноса тепла, массы и количества движения через поверхность раздела.

Мы осознаем, что для точных измерений нам нужно полагаться только на неинвазивные методы, которые не нарушают поток из-за их физического проникновения внутрь области потока. Кроме того, разработка установок для инвазивного измерения жидкости и их обслуживание действительно дороги. Несмотря на то, что паросодержание влияет на другие важные параметры, которые определяют общий межфазный поток между взаимодействующим газом и жидкостью, оно также зависит от многих переменных, включая давление газа, термодинамику, геометрию и размеры емкости, скорость потоков жидкости и газа и др.

Текущее исследование концентрируется на характеристике межфазных явлений с помощью применения техники ERT для получения неинвазивных сканирований, включая области, находящиеся под воздействием струи пара, а также окружающей воды. Чтобы количественно оценить влияние окружающих условий (т.е. температуры окружающей воды), мы попытались опреде-

лить паросодержание сверхзвуковой струи пара в воде по результатам сканирования ERT.

Эти сканирования были основаны на разнице электропроводностей между газовой и жидкой фазами. Кроме того, были приложены все усилия для поддержания однородной температуры переохлажденной воды внутри емкости или, по крайней мере, в течение временного интервала, когда устройство ERT использовалось для обеспечения сканирования жидкости в емкости на уровне электродов, установленных на внутренние стенки сосуда.

ERT — полезный метод для характеристики жидкой фазы в технологических сосудах, содержащих многофазные потоки, путем регистрации градиента проводимости [17]. Однако пригодность метода для диагностики многофазного потока была связана с теми случаями, когда непрерывная фаза является проводящей, наряду с существованием градиента проводимости между взаимодействующими слоями жидкости различных фаз. В тех ситуациях, когда непрерывная фаза представляет собой жидкость, а газ (пар) является дисперсной средой, для измерения паросодержащей фракции может использоваться ERT [18]. Однако полезность метода ставится под сомнение при измерении фазовых распределений и фазовых скоростей, которые могут существенно меняться как во времени, так и в пространстве [19].

Таким образом, для диагностических измерений потока ключевыми требованиями являются точность оборудования, а также отсутствие его проникновения в поток жидкости. Однако такие требования невыполнимы из-за физического размера/формы датчиков при их введении внутрь тела жидкости. Таким образом, чтобы правильно определить проводимость и ее изменение в области течения, необходимо исключить проникновение прибора внутрь тел взаимодействующих фаз. Это привело к инновациям в методике диагностики жидкости, которая может фиксировать изменение электропроводности в области потока взаимодействующих жидкостей с помощью электродов, расположенных на периферийной стенке сосуда. Эта концепция направлена на решение задачи измерения неоднородности в многофазных системах в ядерной и перерабатывающей промышленности [20], в нефтяной [21] и многих других областях.

Основная цель настоящего исследования — изменить направленность предыдущих исследований сверхзвуковой струи пара в воде на более конкретный подход за счет использования сканирования проводимости методом ERT.

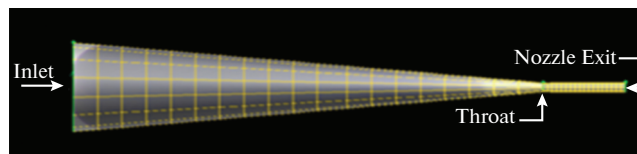


Рис. 1. Схема сверхзвукового сопла.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для создания сверхзвуковой струи пара при рабочем градиенте манометрического давления 1.5–3.0 бар использовалось сопло специальной формы, имеющее сужающуюся и расширяющуюся секции, как показано на рис. 1.

Сопло было разработано и апробировано для создания сверхзвуковой паровой струи [6, 7]. Производительность сопла была успешно оценена с помощью CFD-схемы, соответствующей манометрическому давлению 1.5–3.0 бар, путем расчетов модели DCC [10]. Сверхзвуковое сопло, входящее в состав экспериментальной установки, соединялось с котлом гибкой тefлоновой трубкой, вокруг которой были намотаны спиральные стальные кольца. Котел мог обеспечивать пар при максимальном динамическом давлении 4 бар.

Схема резервуара (колонны) с расположением смонтированных электродов представлена на рис. 2. Четыре кольца электродов были установлены заподлицо с внутренними стенками колонны с вертикальным расстоянием между любым из двух колец электродов, равным 2 см. Кроме того, окружное расстояние по периферии колонны между центрами любых двух соседних электродов составляло 0.85 см. Нижний край электродов нижнего кольца находился чуть выше выхода из сопла. Здесь полезно указать, что нагнетание пара в воду через сопло следует теории сжимаемого потока [22], которая основана на градиенте давления на выходе из сопла и противодействии, что приводит к генерации волн расширения на выходе из сопла. В результате повышение давления пара пропорционально влияет на расход потока через сопло и давление на выходе из сопла.

Таким образом, область, охватывающая выход из сопла и прилегающую зону, использовалась для фиксации изменения. Сканы относятся к наиболее расширенной части паровой струи, которая визуально расположена на ~2.4–2.6 см выше среза сопла. Пар вводился через центр колонны. Таким образом, встречное расположение электродов вместе с “гибкой стратегией зондирования” (FSS) [23] позволило фиксировать изменения электропроводности в интересующей нас плоскости [24]. Мы решили приложить потенциал к электродам в противоположном направлении, и причина заключалась в том, что струя пара располагалась в центре колонны. Другое потенциаль-

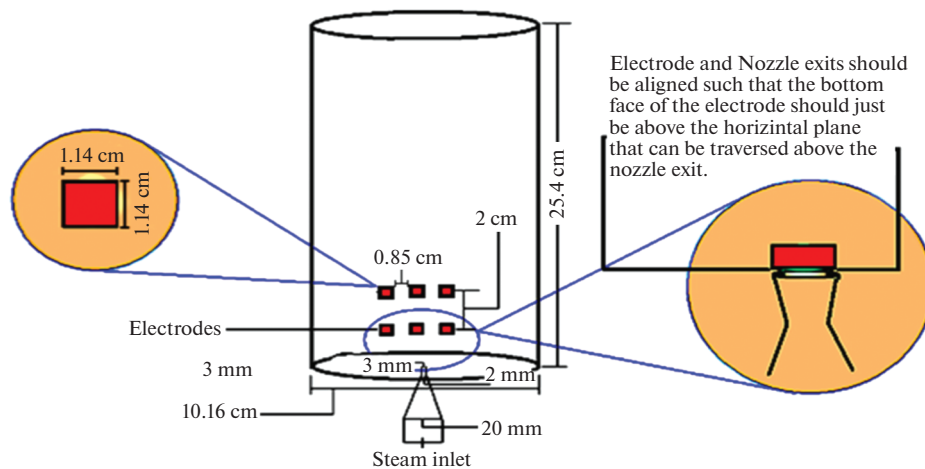


Рис. 2. Схема сосуда и расположение установленных электродов.

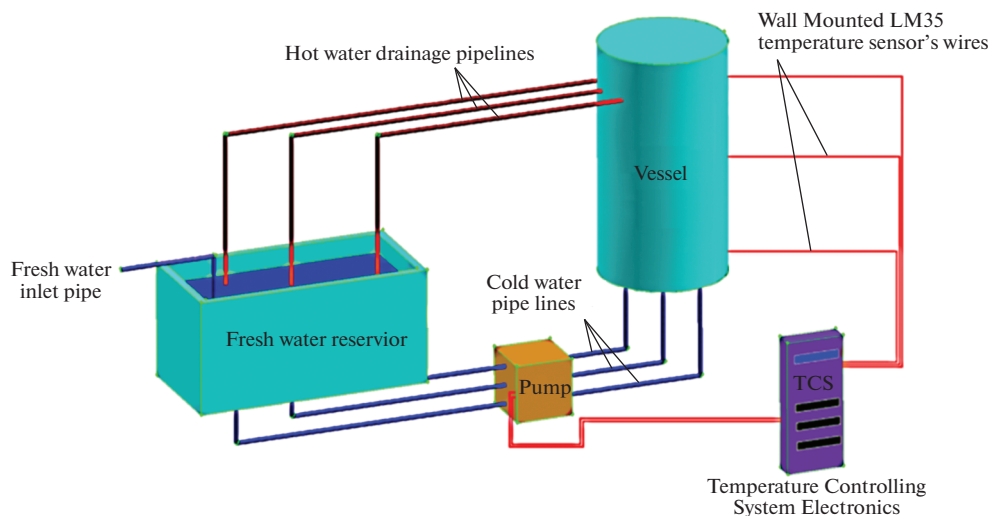


Рис. 3. Система циркуляции воды.

ное применение стратегии включает соседнее расположение, которое обеспечивает более высокую чувствительность, однако это применимо к области, прилегающей к стенкам колонны.

Размеры электродов были выбраны с учетом того факта, что площадь, на которую воздействуют 16 электродов, должна составлять 60% от общей поверхности исследуемой области, чтобы определить максимальную различимость в случае противоположного расположения [25]. Кроме того, значение тока возбуждения, которое применялось, составляло 75 мА, тогда как температура воды в колонне оставалась неизменной (в течение времени, когда система ERT сканировала текучую среду).

Температура воды поддерживалась постоянной в течение некоторого времени за счет посто-

янной циркуляции воды в резервуаре, как показано на рис. 3. Вода подавалась в основание колонны насосом с системой контроля температуры (TCS).

Для определения нестабильности КГ в сверхзвуковой струе пара, взаимодействующей на границе раздела с окружающей водой, был разработан датчик, содержащий микроконтроллер (AT89C51), ключевые кодеры (MM74C922), ключевые декодеры (74HC137) и твердотельные переключатели (Max 4665). Шестнадцать электродов из нержавеющей стали были установлены по окружности вокруг колонны \varnothing 101.6 мм, и такие блоки были расположены в 3 местах с зазором 2 см между соседними электродными кольцами. Таким образом, в общей сложности 48 электродов было использовано для создания полной установки сенсорной системы, которая могла регистрировать

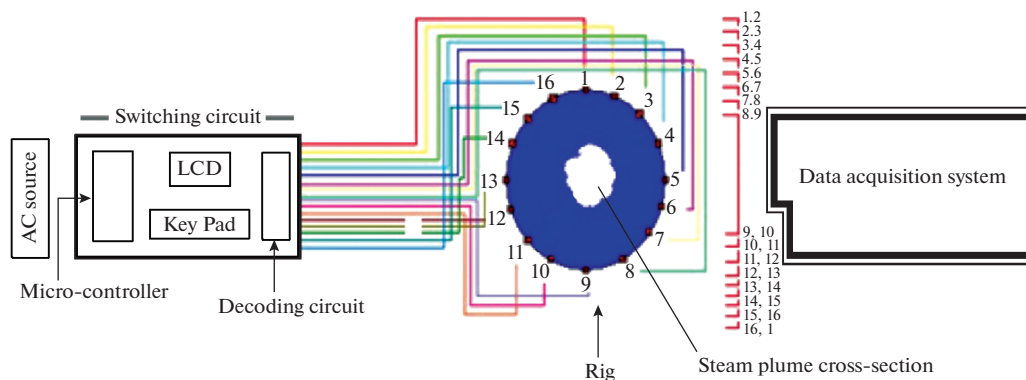


Рис. 4. Схема расположения датчиков для исследования пароводяного потока.

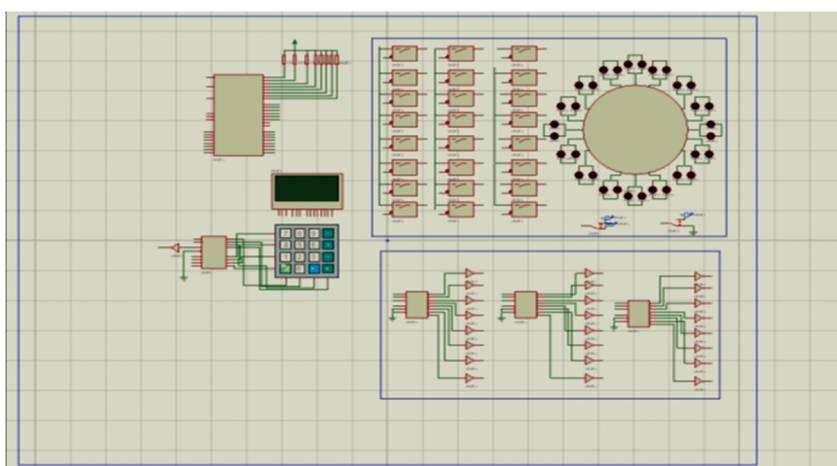


Рис. 5. Схема мультиплексирования.

изменение размера области и, следовательно, границы раздела, занимаемой сверхзвуковой струей пара и водой. Схема расположения электронного блока датчика представлена на рис. 4, а плоскость электродов, установленных на внутренних стенках колонны, показана на рис. 2.

Датчик работал от источника переменного тока напряжением 220 В при частоте 50 Гц. Кроме того, батарея с напряжением 5 В использовалась для подачи постоянного тока на микроконтроллер, тогда как вторая батарея с потенциалом ± 12 В использовалась для питания твердотельных переключателей Max 4665. Номинальная мощность прибора составляла 3 мА при работе с максимальной нагрузкой. Микроконтроллер с 8 битами имел 4 порта (0–3), которые использовались для получения входных данных и применения логических схем управления: встречной, смежной и косинусной.

На рис. 5 показана схема контура, а на рис. 6 виден блок мультиплексирования, который указывает на то, что соседние сигналы доставляются на смежные электроды, что подтверждается од-

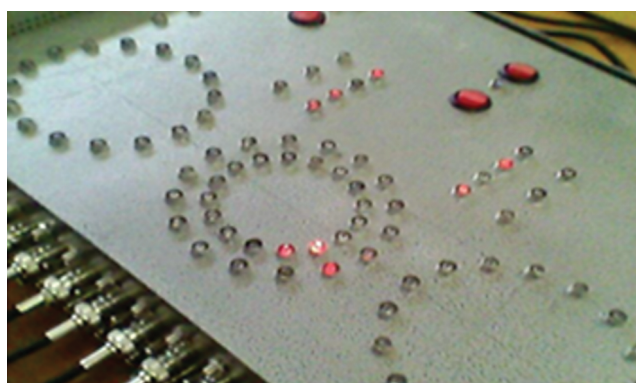


Рис. 6. Снимок, показывающий коробку мультиплексирования.

новременным миганием двух светодиодов. Следует отметить, что мы использовали все три режима управления по току, т.е. смежный, встречный и косинусный, но упомянули здесь сканирование на основе встречной стратегии. Шестнадцатерич-

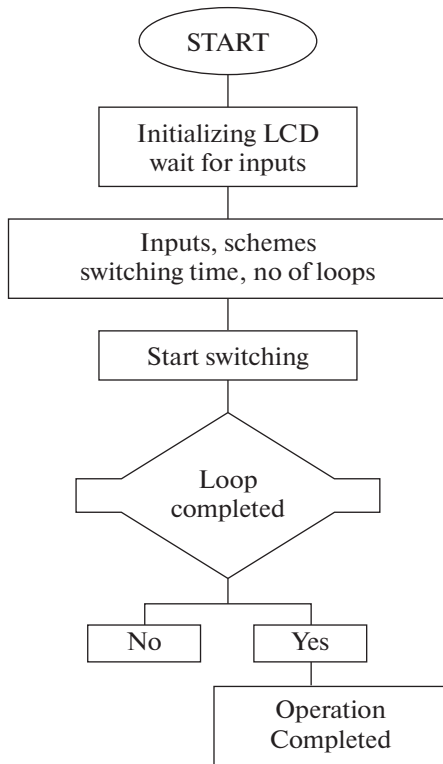


Рис. 7. Блок-схема, показывающая последовательность программы управления.

ная клавиатура была подключена к порту 3 микроконтроллера через кодировщик клавиш MM74C922, который был назначен для обеспечения входов в систему.

В то время как жидкокристаллические дисплеи HD 47780 с точечной матрицей 16×4 были подключены к микроконтроллеру через порт 1, декодеры 74НС137 были назначены на порт 2 для выполнения прямого переключения сигналов путем принятия схем декодирования. Аналоговые переключатели с низким сопротивлением (5 Ом), CMOS, использовались для подачи сигналов переменного тока через декодер 74НС137 на электроды. Для разработки программного обеспечения датчика был применен язык C с использованием Keil IDE, а последовательность операций управляющей программы можно увидеть на рис. 7 в виде блок-схемы. Сигналы переменного тока подавались на электроды через карту сбора данных National Instruments, обозначенную как PCI-6033E, содержащую процедуру сбора данных. Электронная система, содержащая 64 канала вместе с переключателями типа banana switch, принимала сигнал с каждого электрода, таким образом собирая данные на 1000 выборок/с.

Для соединения переключателей с электродами была принята смежная схема (рис. 8). Электроды 1 и 2 были связаны с двумя переключателя-

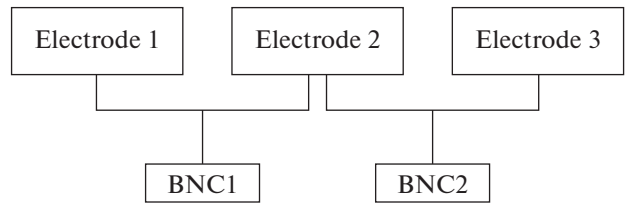


Рис. 8. Схема соединения выключателей banana switch с электродами.

ми banana switch через один кабель BNC1, тогда как электроды 2 и 3 были подключены к переключателям через кабель BNC2. Такая схема была выполнена для всех 16 электродов.

Полученные таким образом необработанные данные были отфильтрованы с применением встроенного в MATLAB ML-FILTER. Из двух наборов данных один был собран без впрыска пара и обозначен как “водяной” файл, а другой был собран с закачкой пара, и он назывался “паровым” файлом. Профили, построенные из этих наборов данных, можно увидеть на рис. 9, который представляет собой типичный график для интервала 20 мс, а графики для интервалов 40, 60, 80, 100, 200, 400, 600, 800 и 1000 мс аналогичны. Данные для значений среднеквадратичной скорости V_{rms} обрабатывались в диапазоне температуры воды от 30 до 60°C с шагом 5°C, включая все временные интервалы. Полученные данные затем обрабатывались с помощью EIDORS для получения сканированных изображений, реконструированных по схеме конечных элементов, представляющей прямые вычисления, и нормализованного нелинейного решателя для получения уникального и стабильного обратного решения

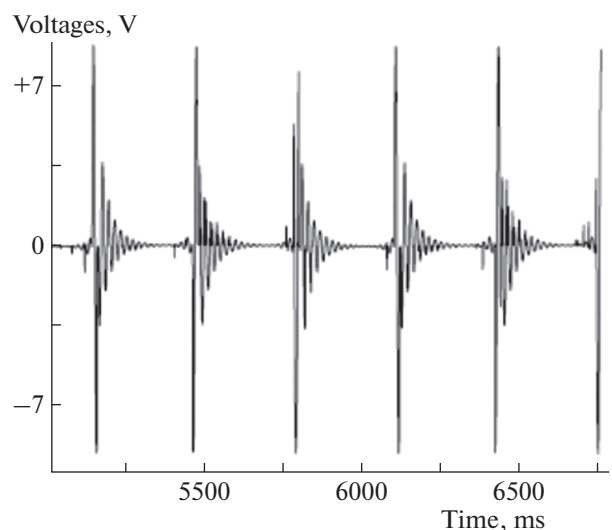


Рис. 9. Типичный график данных для пара, собранных за 20 мс.

Таблица 1. Условия проведения экспериментов

№	Параметр	Диапазон	Шаг	Число экспериментов
1	Давление, бар	1.5–3.0	0.5	4
2	Температура окружающей воды (при калибровке и в экспериментах), °С	30–60	5	7
3	Входной диаметр сопла, мм	20	–	–
4	Диаметр горловины сопла, мм	2	–	–
5	Выходной диаметр сопла, мм	3	–	–
6	Диаметр тефлонового стержня, мм	6.0	–	–1
7	Температура нагрева тефлонового стержня, °С	133.54; 127.41; 120.23; 111.37	–	4
8	Общие калибровочные испытания для каждой комбинации диаметра и температуры тефлонового стержня	–	–	5
9	Общее число калибровочных тестов	–	–	140

Таблица 2. Действительное и завышенное паросодержание с применением системы ERT

Температура тефлонового стержня, °С	Соответствующее давление из таблиц параметров пара [28], бар	Общее паросодержание {Фактическое + завышенное} тефлонового стержня, %							Фактическое паросодержание тефлонового стержня, %
		Температура окружающей воды, °С							
		30	35	40	45	50	55	60	
133.54	3.0	81.02	81.32	82.08	82.24	82.83	82.99	83.44	0.35
127.41	2.5	72.14	75.21	75.39	79.21	79.46	79.85	79.83	0.35
120.23	2.0	54.91	54.91	65.41	65.41	65.46	69.49	71.08	0.35
111.37	1.5	46.16	46.16	46.16	46.16	46.63	50.31	50.59	0.35

[26]. Инструментарий EIDORS версии 3.7.1 был использован для обработки данных настоящих экспериментов.

Калибровка установки. Использование установки ERT в качестве неинвазивного метода диагностики жидкости было доказано в предыдущих исследованиях “Электрические резистивные томографические сенсорные системы для промышленного применения” (Chem. Eng. Commun. 1999. V. 175. P. 49). Изменения, которые влияют на проводимость воды, регулируются множеством факторов, включая концентрацию носителей заряда и колебания температуры воды. Поэтому калибровка нашей разработанной системы необходима для правильного сбора информации, связанной с измерениями паросодержания.

Для этого мы использовали политетрафторэтиленовый (тефлоновый) стержень того же диаметра ~ 6 мм, что и сверхзвуковая паровая струя при данном давлении ~3 бар. Условия проведения калибровочных испытаний представлены в табл. 1. Тефлоновый стержень был нагрет в печи до температуры от 111.37 до 133.54°С, и следует отметить, что указанный диапазон температур соответствует давлению пара 1.5–3.0 бар. Нагретый

стержень был опущен в воду внутри сосуда, подключенного к спроектированной системе ERT. Поскольку системы томографии электросопротивления ERT могут представлять только качественные измерения фазового распределения с точки зрения проводимости текучей среды, то для оценки их измерительной способности на количественной основе эти калибровочные испытания обязательно должны выполняться при тех же гидродинамических условиях, которые мы использовали на этапе экспериментов. Приблизительные размеры тефлонового стержня, в частности его диаметр, были выведены из наших предыдущих исследований [6, 27], проведенных в тех же условиях.

Аналогичные гидродинамические условия использовались в калибровочных испытаниях для экспериментов по моделированию впрыска сверхзвуковой струи пара в недогретую воду. Таблица параметров пара [28] используется для заключения о температуре, которую сверхзвуковая паровая струя может иметь при входном давлении 1.5–3.0 бар, т.е. 111.37–133.54°С соответственно. Результаты калибровочных испытаний показали, что существует завышенная оценка измерений, полученных с помощью разработанной системы ERT. По

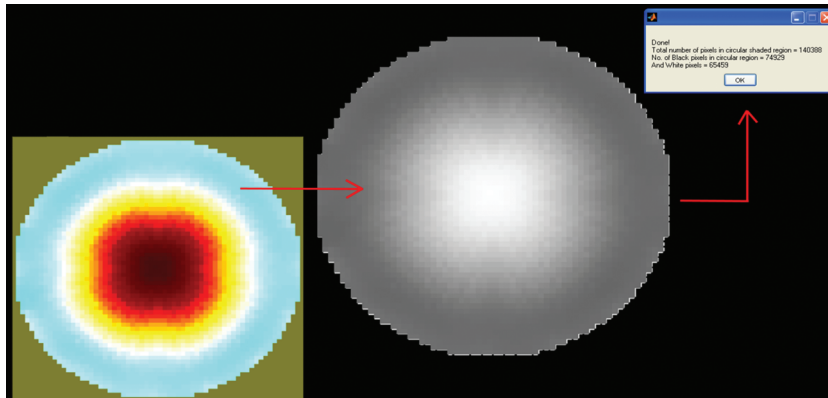


Рис. 10. Преобразование изображения RGB (слева) в изображение оттенков серого и количества пикселей.

результатам серии этих калибровочных испытаний была обнаружена завышенная оценка полного объемного паросодержания (в %). Измеренная доля пустот (в %) соответствует общему объему тefлонового стержня (т.е. завышенное паросодержание + фактическая доля пустот внутри среза жидкости, сканированная одиночным кольцом электродов ERT). Было обнаружено, что приблизительно 45% превышения оценки выходит при температуре окружающей воды 30°C, когда стержень нагревается до 111.37°C, что соответствует давлению пара 1.5 бар. Завышение оценки достигает почти 83%, когда температура окружающей воды повышается до 60°C и стержень нагревается до 133.54°C, что соответствует давлению пара 3.0 бар. Данные, основанные на результатах серии калибровочных испытаний и представленные здесь (табл. 2), на самом деле являются наиболее повторяющимся значением с доверительным интервалом >90%. Результаты калибровочных испытаний представлены в табл. 2.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные с установки ERT были обработаны с помощью программы EIDORS для получения

Таблица 3. Расчетное объемное паросодержание при входном давлении пара 3 бар в соответствии с рис. 11

№ п/п	Температура окружающей воды, °C	Рис. 11	Объемное паросодержание, %
1	30	11а	46.51
2	35	11б	46.62
3	40	11в	50.30
4	45	11г	50.93
5	50	11д	54.90
6	55	11е	62.31
7	60	11ж	65.40

изображений, которые показаны слева внизу на рис. 10.

Это обеспечило значительно улучшенные виды, которые были преобразованы в изображения с градациями серого. Затем изображения были обработаны с использованием функции imread на основе Matlab® [29] для вычисления суммы белых и черных пикселей на изображениях с оттенками серого. На рис. 11 показаны томографии границы раздела “пар–вода” при различных температурах воды от 30 до 60°C при фиксированном давлении пара 3 бар, которые были получены с помощью установки ERT и EIDORS, а также методов обработки изображений в Matlab®. Из этих сканирований видно, что никаких значительных изменений, кроме незначительных колебаний, связанных с паровой струей, не было замечено в общем паросодержании из-за сверхзвуковой паровой струи по сравнению с типичными рабочими условиями. На основе сканирований было получено полное паросодержание (т.е. завышенное + реальное) сверхзвуковой паровой струи при давлении пара 3.0 бар (хотя мы получили сканы при переменном давлении от 1.5 до 3.0 бар, но здесь мы приводим наиболее четкие изображения только при 3.0 бар) и температуре окружающей воды от 30 до 60°C, как указано в табл. 3.

Из табл. 3 можно выявить приблизительное изменение паросодержания из-за изменения температуры окружающей воды. Так с повышением температуры окружающей воды поверхность раздела и площадь, занимаемая струей пара и окружающей ее поверхностью раздела, увеличились. При более низкой температуре окружающей воды (например, 30–35°C) изменение доли пустот (например, 46.51–46.62%) не так очевидно, но становится заметным, медленно увеличиваясь с повышением температуры окружающей воды до 60°C. Основной причиной подъема в этой области под влиянием самого пара и его границы раздела может быть усиленная теплопередача через

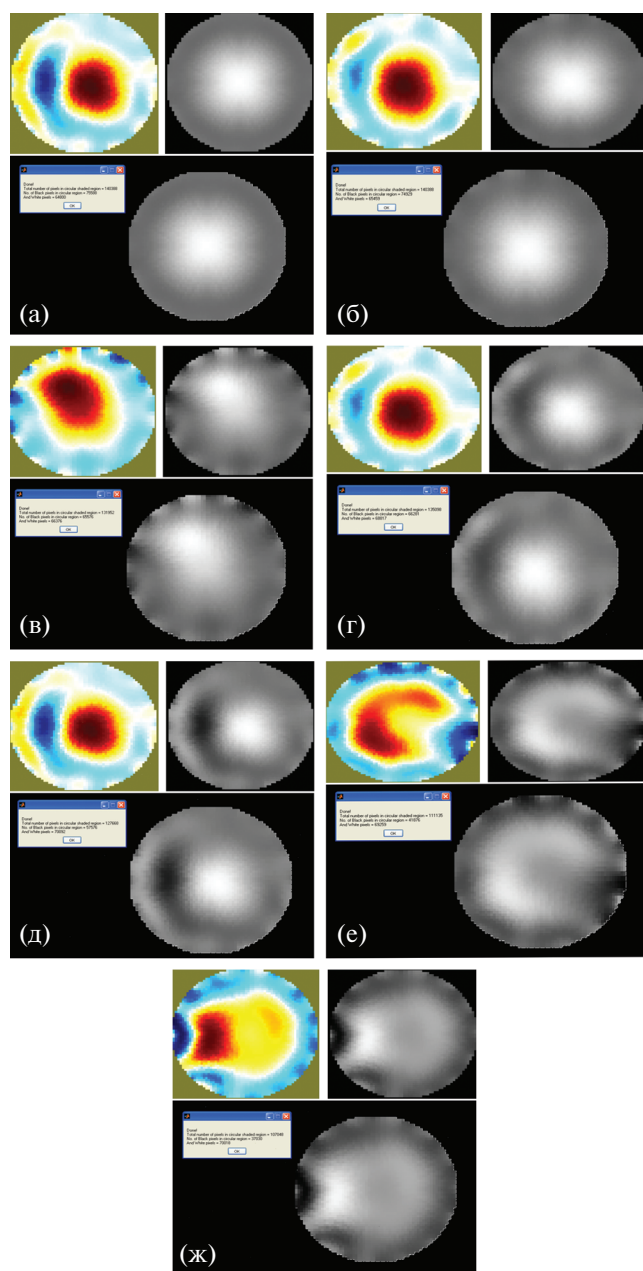


Рис. 11. Границы раздела “пар–вода”, полученные с помощью ERT, EIDORS и Matlab®, при давлении пара 3 бар и при различной температуре воды от 30 до 60°C: а – полное объемное паросодержание 46.51%, температура окружающей воды 30°C; б – 46.62%, 35°C; в – 50.30%, 40°C; г – 50.93%, 45°C; д – 54.90%, 50°C; е – 62.31%, 55°C; ж – 65.40%, 60°C.

поверхность раздела пара с окружающей водой. Передача тепла от струи пара к окружающей воде может быть усилена, так как при более высокой температуре окружающей воды гидродинамические нестабильности становятся доминирующими на границе раздела из-за того, что в это время вода с меньшей плотностью контактирует с поверхностью раздела [6].

Другая информация, которая основывалась на изменении проводимости при сканировании сверхзвуковой струи пара, была получена для оценки распространения изменения температуры, вызванного гидродинамической нестабильностью, как показано на рис. 12. Как видно, при более высокой температуре, т.е. 55–60°C, изменение температуры было зарегистрировано до стенок резервуара (колонны).

Неравномерное распределение проводимости, очевидное на томографическом сканировании, выявляет характерные области, обусловленные струей пара, водной областью и межфазной областью. Однако неравномерный характер паровой струи указывает на грубую структуру струи вдоль основания в сторону колеблющегося поведения границы раздела пар–вода.

Было обнаружено, что граница раздела пар–вода не только вызывала гидродинамическую нестабильность, о чем свидетельствуют неровные промежуточные области внутри сканов, но также эти нестабильности распространялись наружу, в основном, к стенкам колонны. В отличие от предыдущих исследований [10], граница раздела в настоящем исследовании не состояла просто из линии, имеющей почти нулевую толщину. Скорее он имел толщину, по которой происходили межфазные флуктуации, это было связано с нестабильностями КГ, которые образовывались на границе раздела и проникали в воду с дальнейшим распространением внутри нее.

С другой стороны, также можно понять, что там, где повышение температуры окружающей воды помогло нам измерить двухфазные потоки водяного пара на основе доли пустот, пониженная температура приводит к уменьшению доли пустот и, следовательно, площади воздействия границы раздела и паровой струи. Также упоминалось, что поверхность раздела демонстрировала потерю устойчивости при более низкой температуре, поэтому температура окружающей воды может стабилизировать струю пара внутри воды.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впрыск сверхзвукового пара в переохлажденную воду представляет собой очень сложное и комплексное явление. Сенсорная система была специально разработана и сконструирована для изучения этого явления, и, как результат, указывала на явление прямой контактной конденсации (DCC) в сверхзвуковой паровой струе. Система была создана с использованием микроконтроллера, твердотельных переключателей и других соответствующих электронных компонентов. Изображения, полученные с помощью датчиков, обеспечивают хорошее доказательство значительного увеличения диаметра области под влиянием гра-

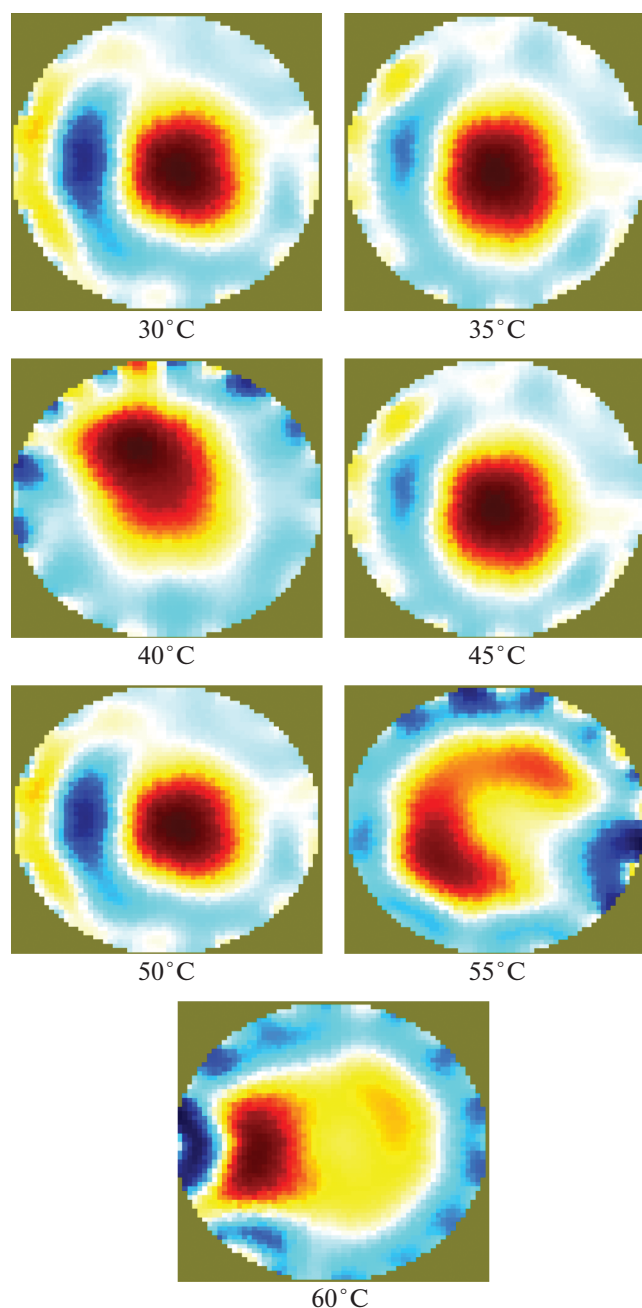


Рис. 12. Качественные нарушения однородности, наблюдаемые при различной температуре воды в резервуаре.

ницы раздела сверхзвуковой паровой струи между паром и водой. Пар закачивался в переохлажденную воду с контролируемой температурой, измерения которой проводились с помощью трех цифровых датчиков температуры LM35, установленных на стенках емкости, и платы PCI-6033 NI DAQ с 64 аналоговыми каналами. Было замечено, что с увеличением температуры окружающей воды площадь, находящаяся под воздействием границы раздела, и, следовательно, паровая струя

увеличивались, что было количественно определено с точки зрения паросодержащей доли струи. Другой аспект этой проблемы, который был рассмотрен в данном исследовании, — это влияние температуры окружающей воды и давления пара на входе на гидродинамические возмущения, которые являются основными причинами неустойчивого характера взаимодействия. Было обнаружено, что повышение температуры окружающей воды способствует распространению области воздействия паровой струи внутри воды, а понижение температуры сокращает эту зону и, следовательно, распространение и усиление гидродинамических неустойчивостей, которые являются основными причинами турбулентного пограничного слоя паровой струи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Правительству Российской Федерации, Политехническому институту и кафедре гидравлики и гидропневмосистем Южно-Уральского государственного университета за поддержку этой работы на основании постановления № 211 Правительства РФ, договор № 02. А03.21.0011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu X.-Z., Yan J.-J., Li W.-J., Pan D.-D., Chong D.-T. // Chem. Eng. Sci. 2009. V. 64. P. 5002. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2009.08.007>
2. Chan C.K., Lee C.K.B. // Int. J. Multiph. Flow. 1982. V. 8. P. 11. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(82\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0301-9322(82)90003-9)
3. Kerney P.J., Faeth G.M., Olson D.R. // AIChE J. 1972. V. P. 18. P. 548. <https://doi.org/10.1002/aic.690180314>
4. Weimer J.C., Faeth G.M., Olson D.R. // AIChE J. 1973. V. 19. P. 552. <https://doi.org/10.1002/aic.690190321>
5. Del Tin G., Lavagno E., Malandrone M. // Experimental study on steam jet condensation in subcooled water pool. 1983. P. 134–136.
6. Khan A., Haq N.U., Chughtai I.R., Shah A., Sanaullah K. // Int. J. Heat Mass Transf. 2014. V. 73. P. 521. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2014.02.035>
7. Sanaullah K., Khan A., Takriff M.S., Zen H., Shah A., Chughtai I.R., Jamil T., Fong L.S., Haq N.U. // Int. J. Heat Mass Transf. 2015. V. 84. P. 178. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2014.12.073>
8. Khan A., Sanaullah K., Takriff M.S., Zen H., Rigit A.R.H., Shah A., Chughtai I.R., Jamil T. // Chem. Eng. Sci. 2016. V. 146. P. 44. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2016.01.056>
9. Datta D., Jang C. // IAEA Second Int. Symp. Nucl. Power Plant Life Manag. Shanghai. China, 2007.

10. *Shah A., Chughtai I.R., Inayat M.H.* // Chinese J. Chem. Eng. 2010. V. 18. P. 577.
[https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(10\)60261-3](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(10)60261-3)
11. *Khan A., Sanaullah K., Sobri Takriff M., Hussain A., Shah A., Rafiq Chughtai I.* // Flow Meas. Instrum. 2016. V. 47. P. 35.
<https://doi.org/10.1016/J.FLOWMEA-SINST.2015.12.002>
12. *Davies J.T., Ting S.T.* // Chem. Eng. Sci. 1967. V. 22. P. 1539.
[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(67\)80192-1](https://doi.org/10.1016/0009-2509(67)80192-1)
13. *Jeffries R.B., Scott D.S., Rhodes E.* // Proc. Inst. Mech. Eng. Conf. Proc. 1969. V. 184. P. 204.
https://doi.org/10.1243/pime_conf_1969_184_097_02
14. *Van Meulenbroek B.M., van de Wakker B.M.* // Int. J. Heat Mass Transf. 1985. V. 28. P. 886.
[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(85\)90240-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(85)90240-6)
15. *Woodmansee D.E., Hanratty T.J.* // Chem. Eng. Sci. 1969. V. 24. P. 299.
[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(69\)80038-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(69)80038-2)
16. *Wu X.Z., Yan J.J., Li W.J., Pan D.D., Chong D.T.* // Chem. Eng. Sci. 2009. V. 64. P. 5002.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.08.007>
17. *Huang C.N., Yu F.M., Chung H.Y.* // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2008. V. 57. P. 1193.
<https://doi.org/10.1109/TIM.2007.915149>
18. *Jia J., Babatunde A., Wang M.* // Flow Meas. Instrum. 2015. V. 41. P. 75.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.10.010>
19. *Dyakowski T.* // Meas. Sci. Technol. 1996. V. 7. P. 343.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/3/015>
20. *Woldesemayat M.A., Ghajar A.J.* // Int. J. Multiph. Flow. 2007. V. 33. P. 347.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphase-flow.2006.09.004>
21. *Thomas J. Hanratty.* Gas-Liquid Flow in Pipelines, Argonne, IL, 2005.
<https://doi.org/10.2172/837116>
22. *Zucrow M.J., Hoffman J.D.* GasDynamics. 1976. V. 1, 2.
23. P2000 Electrical Resistance Tomography System ITS System 2000 Version 5.0 Software Operating Manual, 2005.
24. *York T.A.* Status of electrical tomography in industrial applications // Process Imaging Autom. Control / Eds. H. McCann, D.M. Scott. SPIE. 2001. P. 175.
<https://doi.org/10.1117/12.417163>
25. *Pinheiro P.A.T., Loh W.W., Dickin F.J.* // Electron. Lett. 1998. V. 34. P. 69.
<https://doi.org/10.1049/el:19980092>
26. *Polydorides N., Lionheart W.R.B.* // Meas. Sci. Technol. 2002. V. 13. P. 1871.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/12/310>
27. *Khan A., Sanaullah K., Takriff M.S., Zen H., Rigit A.R.H., Shah A., Chughtai I.R., Jamil T.* // Chem. Eng. Sci. 2016. V. 146. P. 44.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.01.056>
28. Steam Tables // A-to-Z Guid. to Thermodyn. Heat Mass Transf. Fluids Eng. Begellhouse, n.d.
https://doi.org/10.1615/AtoZ.s.steam_tables
29. *Thompson C.M., Shure L.* Image Processing Toolbox: For Use with MATLAB[user's Guide], MathWorks, 1995.