

УДК 01-203, 01-327, 02-211

НОВЫЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ В НЕПРОЗРАЧНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ

Е. И. Биченков, Е. И. Пальчиков, С. В. Сухинин, А. Н. Черемисин,
А. И. Романов, М. А. Романюта, К. С. Селезнев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: palchikov@hydro.nsc.ru

Предложен и обоснован метод количественного анализа многофазных течений и объектов сложного состава с регистрацией изображения на ПЗС-матрице, учитывающий спектральные характеристики потока рентгеновского излучения. Проведено тестирование метода на объектах известного состава и известной формы. Сформулированы новые подходы к решению ряда научных задач, связанных с использованием современных методов регистрации и компьютерных средств обработки рентгеновских изображений.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, спектральный состав, поглощение, фотоприемник, ПЗС-матрица, цифровая обработка изображений, томография, фильтрация, многокомпонентный флюид.

ВВЕДЕНИЕ

Среди разнообразных методов исследования движения материала и его распределения в пространстве видное место принадлежит рентгеновской методике. В ряде случаев она оказывается практически единственной, позволяющей получить достоверную информацию об исследуемом объекте. Это относится к изучению процессов при взрыве, высокоскоростном ударе, к исследованию поведения материалов в условиях сильных радиационных помех, при экранировке исследуемых образцов непрозрачными стенками или потоками вещества.

Достаточно давно разработаны и апробированы томографические рентгеновские методики [1, 2]. Они оказались сложными и дорогими. Поэтому как в научных исследованиях, так и в промышленных установках до сих пор преобладают простые рентгеновские методики [3]. Чаще всего это просто рентгеновская денситометрия по одной координате [4, 5] либо теневая фотография объекта, по плотности почернения фотоматериала на которой можно с не очень высокой точностью составить представление о размерах, форме и распределении материала, а по нескольким таким фотографиям, сделанным в разные моменты времени, — о динамике процесса. В установках [4] применяется простая линейная модель поглощения излучения, изложенная в [6] и предполагающая монохроматичность излучения. Спектральные характеристики в модели учитываются, но в расчетах применяется очень приближенная модель малой точности, требующая дополнительных калибровок.

Современное состояние приборной и элементной базы и компьютерной техники, уровень и объем накопленных знаний о процессах взаимодействия рентгеновского излучения с веществом позволяют сместить акценты в постановке задач о создании новых методов количественной рентгенографии. Мы видим перспективы разработки новых методов

научной рентгенографии в проведении исследований в двух направлениях. Это использование современных средств регистрации и компьютерных средств обработки изображений для повышения информативности, точности и достоверности измерений без усложнения постановки эксперимента; разработка методик измерений, детально учитывающих спектральный состав потока, создаваемого излучателем, спектры поглощения входящих в состав исследуемого объекта материалов и спектральные характеристики детектора, что также может быть использовано для увеличения информативности и точности измерений. Некоторые результаты исследований в этих направлениях изложены в настоящей работе.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМЫ РЕНТГЕНОГРАФИРОВАНИЯ

В настоящее время имеется ряд сложившихся традиционных схем установок для исследования образцов при достаточно медленном, квазистатическом изменении условий. Примером таких процессов являются исследования фильтрации одной или нескольких жидкостей в пористой среде с жестким скелетом, интерес к которым поддерживается значимостью таких исследований для решения ряда задач, связанных с добычей нефти.

Концентрации различных жидкостей в пористом образце материала обычно измеряются просвечиванием его по диаметру узким пучком рентгеновского излучения шириной и высотой примерно 3 мм. При этом условия эксперимента позволяют двигать синхронно вдоль образца излучатель и расположенный на противоположной стороне образца приемник излучения [4, 5]. В результате получают распределение концентрации (или график насыщения образца жидкостью) вдоль оси. Цена деления такого графика определяется шириной пучка, в котором происходит накопление данных, и разрешением позиции тележки. Установки, построенные по такой схеме (рис. 1, *a*), по существу, являются рентгеновскими денситометрами и дают одномерную картину распределения материала вдоль оси.

Замена регистрирующего детектора линейкой приемников (обычно это линейка ПЗС с полоской люминофора, преобразующего рентгеновское излучение в видимую область спектра) позволяет существенно увеличить информативность эксперимента. Изображения, полученные по такой схеме, существенно двумерны, и из них невозможно получить информацию о трехмерной структуре образца и трехмерной структуре течения.

Двадцать лет назад создание светочувствительной линейки с разложением изображения на сотни элементов было технологической вершиной построения многоэлементных светочувствительных детекторов. В настоящее время созданы и освоены в промышленном выпуске двумерные светочувствительные ПЗС-матрицы с миллионами элементов на их поверхности. Использование такой матрицы — следующий и совершенно естественный

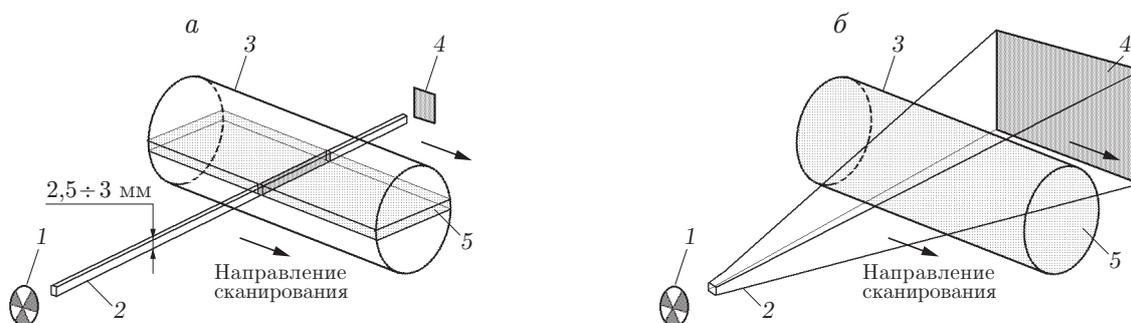


Рис. 1. Схемы сканирования:

- a* — одномерное; *b* — двумерное со сдвигом; 1 — источник рентгеновского излучения;
- 2 — коллимированный пучок излучения; 3 — образец керна; 4 — приемник излучения;
- 5 — область измерений

шаг в научной рентгенографии. Существенным достоинством ПЗС-матрицы является то, что изображение в современных регистрирующих промышленных приборах технического видения представляется в оцифрованном виде с большим количеством уровней измерения яркости каждого элемента, высокой степенью повторяемости и высокой линейностью передаточной характеристики, т. е. с очень высокой точностью. Уже более десяти лет назад ПЗС-матрицы превосходили фотопленку по динамическому диапазону и линейности на три порядка [7].

Матрица позволяет отказаться от использования дорогих и дефицитных рентгеновских пленок и получать за одну вспышку качественную фотографию некоторой фазы импульсного процесса с шумами, ограниченными только квантовой природой сигнала. В случае процессов, происходящих достаточно медленно, можно, осуществляя сдвиг объекта относительно источника и приемника излучения, получить серию изображений на одну матрицу и использовать их для дальнейших расчетов.

Одна из схем сканирования с выводом серии конических проекций образца показана на рис. 1,б. Для каждого сечения образца при этом получается набор множества косых проекций, достаточный для построения томографических сечений образца.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Элементная и метрологическая база новых методик измерений. Измерительный тракт всякой рентгенографической схемы состоит из источника излучения, исследуемого объекта и детектора излучения. Проанализируем последовательно имеющиеся на сегодняшний день знания о спектральных характеристиках этих трех главных элементов измерительного канала и их точности, а также возможности современных средств регистрации изображений для использования этих знаний в наибольшей степени.

Источник излучения. Измеренные спектры различных рентгеновских аппаратов и методы их моделирования описаны в [8, 9]. Довольно подробный обзор полученных результатов, методик измерения и методов расчета спектров таких приборов сделан в [10].

Большой прогресс достигнут в разработке методов расчета спектра тормозного излучения. Отметим важный момент, выясненный в последнее время. Оказывается, элементарный акт взаимодействия электрона заданной энергии с атомом сегодня известен настолько хорошо, что разумное использование метода Монте-Карло при розыгрыше всего 1000 историй позволяет рассчитать спектр тормозного излучения с относительным стандартным отклонением не более 5 %, т. е. в пределах общепринятой экспериментальной точности. Такая методика отлажена в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, и мы с помощью наших коллег из этого института использовали эту благоприятную возможность.

Наиболее хорошо известны спектры излучения стационарных рентгеновских аппаратов, рабочее напряжение и ток которых стабилизированы.

Ситуация с импульсными приборами значительно хуже. Измерений спектрального состава излучения таких приборов практически нет, стабильность их импульсов невелика, надежные расчетные модели отсутствуют. Об излучении таких приборов чаще всего судят по интегральной дозе, измеряемой каким-либо дозиметром, и по “толщине просвечиваемого слоя” какого-нибудь из широко используемых металлов: железа, алюминия и т. п. В этом случае измерения носят качественный характер. Значительным достижением в свое время оказалось измерение длительности вспышки и мощности дозы некоторых импульсных рентгеновских приборов [11]. Сказанного достаточно, чтобы понять, что создание хорошо протестированной методики измерения спектра излучения импульсных приборов представляет собой самостоятельную проблему для научного исследования.

Взаимодействие излучения с образцом, поглощение излучения. Особенности поглощения излучения всеми элементами периодической таблицы и многими соединениями хорошо изучены, систематизированы и опубликованы. Сегодня к традиционным способам получения информации добавились широкие возможности информационных коммуникаций через каналы сетевой связи. Существует несколько сайтов, на которых представлен обширный материал о взаимодействии рентгеновского излучения с веществом. Массовые коэффициенты поглощения исследуемых веществ нами были получены через Интернет [12] из базы данных Национального института стандартов и технологии США (NIST — National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD).

Система регистрации рентгеновского изображения. Для преобразования рентгеновского изображения в оптическое использовался редкоземельный люминесцентный экран на основе оксисульфида гадолиния Gd_2O_2S (ЗАО “Ренекс”, Новосибирск). Спектры поглощения и ослабления люминофора мы получили из упомянутой выше базы NIST [12].

Для ввода и оцифровки оптических изображений использовалась цифровая ПЗС-камера Ваumer Arg4000. Камера имеет светочувствительный сенсор форматом 2/3 дюйма с прогрессивной разверткой, размер ячейки (пикселя) $6,7 \times 6,7$ мкм, размер изображения 1300×1030 пикселей. Диапазон экспозиций камеры от 200 мкс до 10 с, отношение сигнал/шум без охлаждения лучше 60 дБ. Камера позволяет в однократном снимке получать точность оцифровки 12 бит — 4096 градаций серого.

На основании изложенного можно прийти к выводу, что разработка методики измерений, учитывающей спектр излучателя, спектры поглощения входящих в состав исследуемого объекта материалов и спектральные характеристики детектора, имеет достаточно надежную элементную и метрологическую базу и представляется вполне реалистичной.

БАЗОВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Модель поглощения. За основу для расчетов мы взяли общепринятую модель экспоненциального затухания монохроматического рентгеновского излучения в однородной среде с коэффициентом затухания, зависящим от длины волны и свойств вещества, т. е. принималось, что интенсивность монохроматического излучения, прошедшего через однородный объект, описывается выражением

$$J = J_0 \exp \left(- \int_L \frac{\mu}{\rho}(p) \rho dp \right).$$

Здесь $(\mu/\rho)(p)$ — массовый коэффициент ослабления излучения в точке p ; J_0 — начальная интенсивность излучения; ρ — плотность вещества.

Для немонахроматического источника необходимо учесть зависимость массового коэффициента ослабления потока излучения от энергии. В случае конечного количества однородных веществ, составляющих просвечиваемый объект, в общепринятой линейной модели

$$J(E) = I_0(E) \exp \left(- \sum_i \frac{\mu_i}{\rho_i}(E) \rho_i x_i \right), \quad (1)$$

где $(\mu_i/\rho_i)(E)$ — массовый коэффициент ослабления излучения с энергией E i -го вещества; x_i — толщина вещества с номером i вдоль луча; ρ_i — плотность i -го вещества; $I_0(E)$ — начальная интенсивность излучения с энергией E (спектр излучения рентгеновского аппарата).

Выражение (1) приближенное. В нем не учитывается пространственное распределение вещества вдоль направления распространения рентгеновского излучения. Так как мягкое

излучение поглощается сильнее, чем жесткое, при прохождении слоя вещества спектральный состав излучения изменяется, и интенсивность прошедшего через составной образец рентгеновского излучения должна зависеть от взаимного расположения разных материалов. Учет этого фактора существенно усложняет задачу. Оправданием возможности применить описанную модель взаимодействия излучения с исследуемым объектом служит то, что в настоящей работе использовался рентгеновский источник с рабочим напряжением 70–160 кВ, создающий поток излучения, основная доля энергии которого сосредоточена в интервале $40 \div 140$ кэВ. В ней нет резкого возрастания коэффициентов ослабления, как в области энергий $< 10 \div 15$ кэВ, а сами коэффициенты ослабления меняются незначительно.

ПЗС-камера регистрирует яркость свечения люминофора, которая пропорциональна поглощенной на люминофоре энергии рентгеновского излучения. С учетом поглощения в исследуемом образце выражение для интенсивности излучения, прошедшего через люминофор, можно записать в виде

$$J(E) = I_0(E) \exp\left(-\sum_i \frac{\mu_i}{\rho_i}(E) \rho_i x_i\right) \exp\left(-\frac{\mu_l}{\rho_l}(E) \rho_l d_l\right), \quad (2)$$

и поглощенное люминофором излучение определится разностью (1) и (2):

$$\Delta J(E) = I_0(E) \exp\left(-\sum_i \frac{\mu_i}{\rho_i}(E) \rho_i x_i\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu_l}{\rho_l}(E) \rho_l d_l\right)\right]. \quad (3)$$

Здесь $(\mu_l/\rho_l)(E)$ — массовый коэффициент поглощения; ρ_l, d_l — соответственно плотность и толщина люминесцирующего вещества.

Измеряемой на ПЗС-камере величиной является яркость пикселя. Ее можно получить, проинтегрировав (3) по спектру источника:

$$A = K \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} I_0(E) \exp\left(-\sum_i \frac{\mu_i}{\rho_i}(E) \rho_i x_i\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu_l}{\rho_l}(E) \rho_l d_l\right)\right] dE. \quad (4)$$

В выражении (4) K — интегральный коэффициент, характеризующий преобразование рентгеновского излучения в оптическое и чувствительность камеры. Его нужно определять калибровкой измерительного тракта.

Для нескольких напряжений на рентгеновской трубке (и, соответственно, разных спектров излучения рентгеновского аппарата) можно составить систему уравнений:

$$A_n = K_n \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} I_n(E) \exp\left(-\sum_i \frac{\mu_i}{\rho_i}(E) \rho_i x_i\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu_l}{\rho_l}(E) \rho_l d_l\right)\right] dE, \quad (5)$$

где n — порядковый номер эксперимента; $I_n(E)$ — спектр излучения рентгеновского аппарата с напряжением на трубке E_n ; K_n — коэффициент, определяемый по калибровочному снимку.

Расчет распределения плотности в образце. В результате проведения эксперимента на выходе ПЗС-камеры создается цифровое изображение распределения яркости свечения на люминесцентном экране, т. е. в (5) определяется A_n как функция направления распространения регистрируемого заданным пикселем излучения. Разрешив (5), можно вычислить из этой системы уравнений неизвестное распределение в пространстве плотности материала x_i .

Для отладки методики, контроля ее точности и достоверности и определения дополнительных поправочных коэффициентов, появление которых связано с использованием

приближений в математической модели эксперимента, были проведены тестовые эксперименты по определению толщины объекта в случае, когда на пути рентгеновского пучка находился клин из однородного материала. Задача при этом сводится к решению одного интегрального уравнения, содержащего один варьируемый параметр x_1 . Решение такой задачи не вызывает никаких сложностей и отыскивалось общеизвестными приемами. Для этого определялся функционал $F(x_1)$

$$F(x_1) = \left[A_1 - K \int_{E \min}^{E \max} I_1(E) \exp \left(- \frac{\mu_1}{\rho_1}(E) \rho_1 x_1 \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{\mu_l}{\rho_l}(E) \rho_l d_l \right) \right] dE \right]^2$$

и вариацией отыскивалось распределение x_1 , приводящее к минимуму $F(x_1)$. Как обычно, принималось, что именно это распределение x_1 дает решение задачи.

В случае нескольких однородных веществ задача сводится к решению системы интегральных уравнений. Решение отыскивалось аналогично предыдущему: вводился функционал

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n F_i(x_i), \quad (6)$$

где

$$F_i(x_i) = \left[A_i - K \int_{E \min}^{E \max} I_i(E) \exp \left(- \sum \frac{\mu_i}{\rho_i}(E) \rho_i x_i \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{\mu_l}{\rho_l}(E) \rho_l d_l \right) \right] dE \right]^2,$$

и отыскивался вектор $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, на котором $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ имеет минимум. Этот вектор принимался за решение задачи.

Обработка экспериментальных данных. Обработка экспериментальных данных и поиск решения были разделены на следующие этапы.

Интерполяция вспомогательных данных. По данным таблиц (спектр рентгеновского аппарата, коэффициенты ослабления рентгеновского излучения) строились кубические интерполяционные сплайны, коэффициенты которых вводились в компьютер и использовались в расчетах.

Расширение диапазона измерения яркости. Проводилось осреднение по пикселям изображения и бинирования ПЗС-матрицы. Особенности формирования электронного рельефа изображения в ПЗС-структурах ведут к тому, что с увеличением пространственного разрешения падает количество электронов, накапливаемых в одном светочувствительном элементе структуры, из-за чего возрастает относительная роль флуктуаций числа электронов в элементе и снижается динамический диапазон яркости изображения. Так как общее количество элементов матрицы очень велико, можно в ряде случаев пожертвовать пространственным разрешением, проведя осреднение изображения по нескольким ячейкам либо введя физически объединение ячеек на матрице (бинирование). Тем самым удастся уменьшить шумы, вносимые флуктуациями числа электронов в ячейке матрицы, и увеличить диапазон измерения яркости. Такую корректировку оцифрованного изображения, получаемого на светочувствительной матрице, необходимо делать в схемах, в основу которых положен учет спектрального состава регистрируемого излучения.

В случае неоднородного материала осуществлялось бинирование по площадке 2×2 или 4×4 пикселя, что практически не дает дополнительной точности в разрешении по пространству, но позволяет избежать ошибок, связанных с дискретной природой изображения и статистическими флуктуациями числа электронов, сопровождающими формирование электронного рельефа изображения. Осреднение применялось по большим площадкам,

если это не уменьшало информативность изображения, — например по всем пикселям на ступеньке калибровочного клина.

Построение функционала. После интерполяции вспомогательных данных и ввода в память компьютера изображения строился функционал $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, в котором интеграл по энергии заменяется суммой с шагом $dE = 0,1$ кэВ.

Поиск решения. Поиск вектора $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, обеспечивающего минимум функционала $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, осуществлялся методом деления отрезка пополам и методом перебора в случаях однородного и неоднородного материала соответственно. Отладка программ производилась на виртуальных трехмерных объектах фрактального типа. При проведении этого этапа работы большую помощь авторам оказал Д. Ю. Мехонцев, которому мы искренне благодарны.

Трехфазная среда с известной суммарной толщиной. При фиксированной суммарной толщине задача определения толщин компонентов трехфазной среды эквивалентна определению толщин двухфазной среды и вычислению третьей путем вычитания двух найденных функций из известной суммарной толщины.

Томография при полиэнергетическом спектре. При использовании томографии требуется определить функцию поглощения для каждой точки просвечиваемого объекта. Для решения задачи область поиска разбивалась на ячейки и предполагалось, что внутри каждой ячейки поглощение постоянно. Тем самым задача сводилась к случаю конечного набора разных материалов вдоль каждого луча L . Затем для луча L находился минимум функционала (6) и изложенными выше методами определялись ρ_1, ρ_2, \dots . На заключительном этапе алгебраическим методом либо обратной проекцией с фильтрацией строилась томограмма.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальный стенд был построен в соответствии со схемой регистрации, показанной на рис. 1,б. В качестве источника излучения использовался комплект аппаратуры “ВИП FED160-320” (ООО “Синтез”, Санкт-Петербург). Он представляет собой стабилизированный по току анода, напряжению и интенсивности излучения источник питания со встроенной рентгеновской трубкой типа 0,3БПМ25-150 (АОЗТ “Светлана-рентген”, Санкт-Петербург). Диапазон регулировок: напряжение на трубке — $70 \div 160$ кВ, ток — $0,1 \div 2,0$ мА, время экспозиции — $1 \div 998$ с либо стационарно. Размер фокального пятна $0,8 \times 0,8$ мм. Нестабильность тока, напряжения и интенсивности меньше 0,5 %.

В работе использовалась описанная выше камера Ваumer Arg4000, которая присоединялась к компьютеру через экранированную витую пару с помощью интерфейсной платы на стандартную шину PCI. Управление камерой осуществляется по протоколу LVDS.

Механические перемещения системы сканирования — ввода производились шаговыми двигателями с точностью не хуже 10 мкм. Перемещения независимо контролировались оптическими датчиками координаты. Диаметр образца 30 мм, длина от 30 до 300 мм. Образец помещался в прозрачный для рентгена держатель из композитного материала. Дистанция анод — детектор 750 мм, образец — детектор 50 мм.

Так как в процессе эксперимента проводится оцифровка и накопление тысяч изображений исследуемых образцов, оказалось необходимым построить компьютерную систему управления экспериментом и создать для этого необходимое программное обеспечение. Управление установкой и сбор данных осуществляются компьютером P-IV с частотой процессора 1700 МГц, памятью 512 мегабайт и дисковым накопителем 40 гигабайт. Полученные изображения накапливаются в 16-разрядном формате PNG. Подробные характеристики установки, схема коммуникаций и управления, конструкция системы ввода рентгеновских изображений описаны в [13, 14].

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ

Исследуемые объекты. В качестве исследуемых объектов для отработки и тестирования методики использовались ступенчатые клинья из меди, алюминия и железа известной толщины. Производились снимки одного или двух клиньев из различных веществ. В качестве модели насыщенной пористой среды использовался сухой образец песчаника, перед которым ставились клинья с водой и нефтью (рис. 2). Такой модельный эксперимент несколько не ограничивает общности методики, но значительно упрощает проверку результатов, так как определение насыщенности образца весьма затруднительно.

Однокомпонентная среда. Исследуемые образцы представляли собой наборы пластин алюминия, железа и меди толщиной 1, 0,35 и 1,5 мм. Время экспозиции 3 с, напряжение на рентгеновской трубке 120 кВ, анодный ток 1,5 мА. По результатам обработки снимков были рассчитаны толщины для различных ступеней клиньев. На рис. 3 приведены графики зависимости рассчитанной в условных единицах толщины (ось y) от фактической толщины (ось x) поглощающих пластин. Видно малое отклонение полученной зависимости от линейной. На рис. 3 приведены также функции линейной аппроксимации, полученные методом наименьших квадратов. Коэффициенты корреляции $R^2 = 0,9948$ для железа и

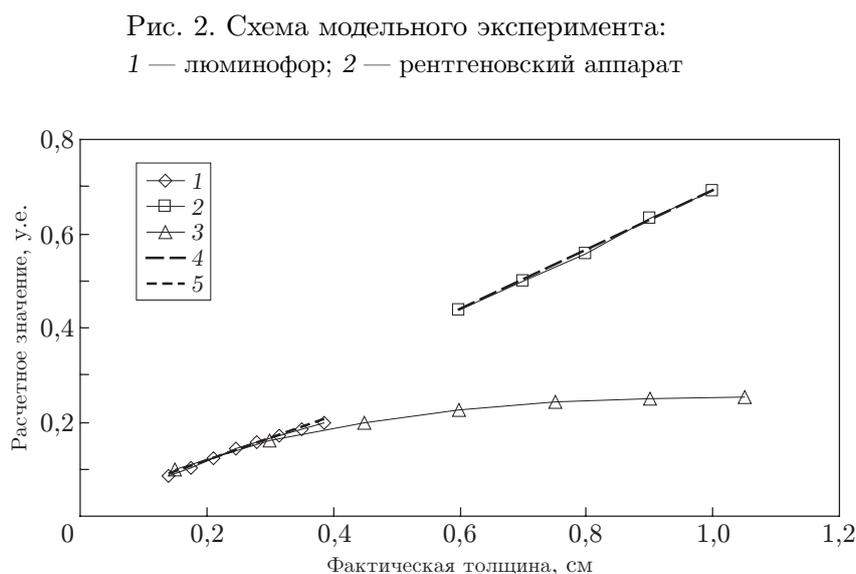
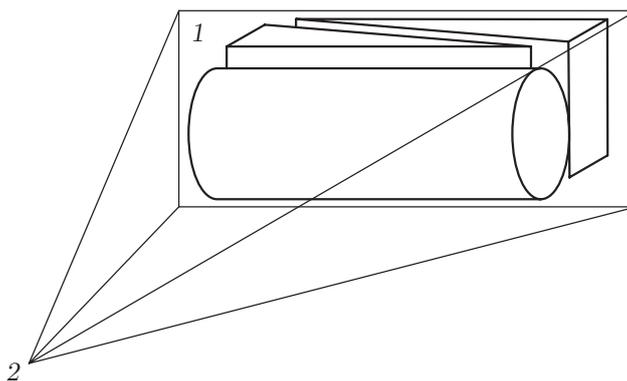


Рис. 3. Зависимость расчетной толщины от фактической для клиньев из алюминия, железа и меди:

1 — Fe; 2 — Al; 3 — Cu; 4 — линейная аппроксимация — $y = 0,465x + 0,0244$; 5 — линейная аппроксимация — $y = 0,64x + 0,052$

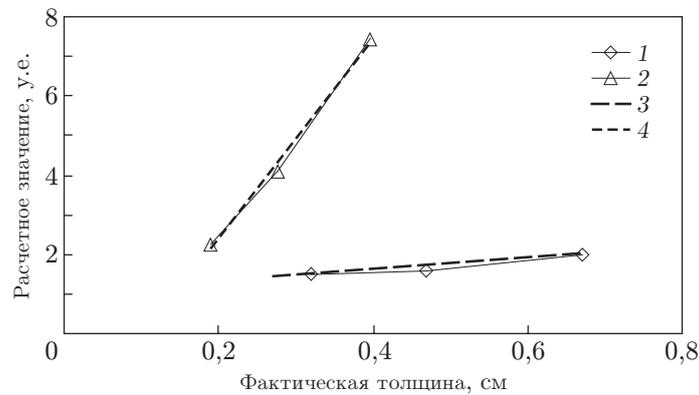


Рис. 4. Зависимость расчетной толщины от фактической для клиньев с водой и нефтью (между клиньями находился пористый образец):

1 — раствор KI; 2 — нефть; 3 — линейная аппроксимация — $y = 25,178x - 2,6276$; 4 — линейная аппроксимация — $y = 1,4687x + 0,9757$

$R^2 = 0,9986$ для алюминия показывают, что зависимости расчетной толщины от фактической с вероятностью 99 % линейные. На рис. 3 для меди видно заметное отклонение от линейного закона зависимости расчетного значения от фактической толщины. Анализ зависимости яркости свечения люминесцентного экрана от толщины медного образца показал, что с ростом толщины слоя меди сигнал выходит на асимптоту, соответствующую фону появляющегося рассеянного излучения. Этот эксперимент показывает естественное ограничение возможностей разрабатываемой методики.

Двухкомпонентная среда. Проверка методики количественного многофазного рентгеновского анализа осуществлялась на клиньях, заполненных двумя разными жидкостями: нефтью и раствором KI в воде (схема эксперимента представлена на рис. 2). Измерения проводились при двух напряжениях на рентгеновской трубке 120 и 160 кВ. Клинья изготавливались из дюралевой фольги толщиной 50 мкм. Ослабление излучения на такой толщине не учитывалось.

Решение задачи в случае двухкомпонентной среды существенно усложняется. Стандартные процедуры для нахождения минимума функции двух переменных ищут только локальный минимум и требуют определения либо начального приближенного решения, либо задания градиента функции. То и другое определить в нашем случае достаточно сложно. Поэтому абсолютный минимум в интересующем нас интервале определялся за несколько итераций методом перебора с использованием переменного шага сетки.

На рис. 4 представлены зависимости расчетной толщины от фактической толщины клиньев с раствором KI и нефтью. Обе они с хорошей точностью ложатся на прямые.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОТЕКАНИЯ СМЕСИ ЖИДКОСТЕЙ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Тестовый томографический эксперимент. В нашем случае для регистрации состояния системы используется набор массивов двумерных рентгеновских изображений, полученных цифровой ПЗС-матрицей. Это позволяет улучшить достоверность измерений плотностей объекта и насыщенных при моделировании нефтяного пласта, проводить обычную и малоракурсную томографию, получать информацию о двух- и трехмерной пространственной структуре образца и течения.

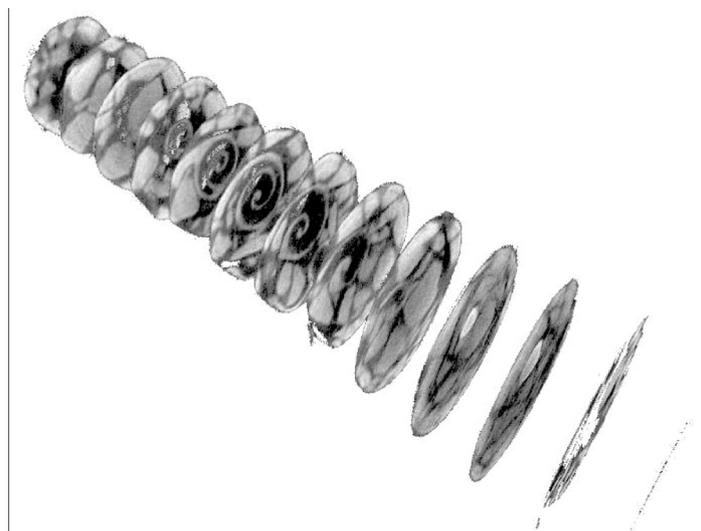


Рис. 5. Система томографических срезов модели пористой среды

Для тестирования метода получения томографии была создана модель пористой среды. Модель состояла из мелких камней и включений (стальной шарик и ракушка). Полученные срезы представлены на рис. 5.

Представление результатов и проблема неоднородности насыщения. Описанные выше новые установки и методики позволяют с хорошей точностью определить структуру неоднородностей вещества, а также скорость фронта течения и концентрацию жидкости в пористой среде. Детальная информация о пространственном распределении концентрации жидкости, полученная на реальных образцах при их насыщении и вытеснении одного компонента флюида с помощью другого, выявила ряд проблем, связанных с представлением полученных результатов [15, 16].

Вычисленные по серии рентгенограмм трехмерные поверхности одинаковой концентрации позволяют детальнее разобраться с эволюцией фронта течения. На рис. 6 показано положение фронта просачивания для трех разных моментов времени. Видно, что фронт сначала отставал вблизи оси образца, затем область отставания сместилась к одному из краев. Кроме того, заметно, что фронт имеет прорывы в виде вытянутых вперед “пальцев” и “занавесов”, которые, скорее всего, связаны с существованием в образце крупных капилляров.

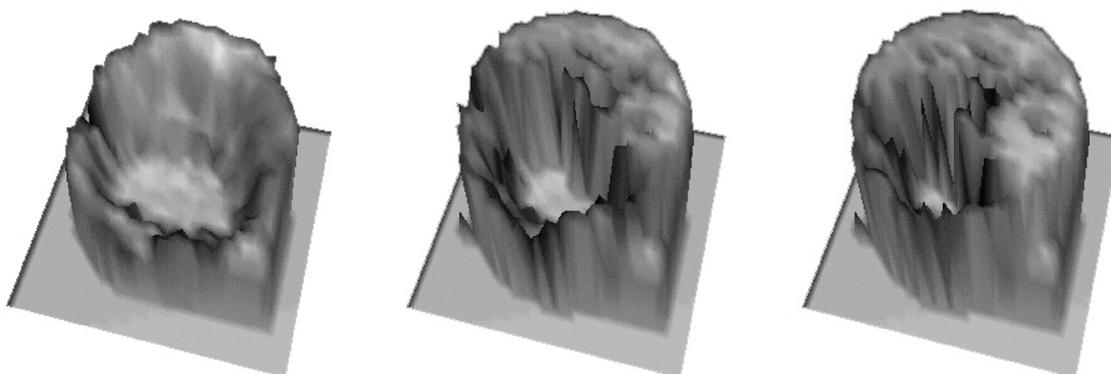


Рис. 6. Поверхности одинаковой концентрации в разные моменты времени

Приведенные выше результаты находятся в согласии с работами [2, 3, 14–16], в которых обсуждались проблемы однородности насыщения пористых образцов многофазной жидкостью. В настоящее время в связи с увеличением количества измерений динамики насыщения с помощью рентгеновских методов вопрос возник на новом уровне и стал более актуальным, а в экспериментах появляются новые дополнительные данные, которые никак нельзя игнорировать. Полученные в настоящем разделе результаты поднимают вопрос о необходимости тщательной статистической обработки количественных измерений интегральной насыщенности образца. При этом для обработки необходимо брать в расчет весь объем образца, измерять степень и характеристики флуктуаций, указывая количественно и качественно степень неоднородности данных и их основные характеристики: пространственный спектр неоднородностей, среднее квадратичное отклонение для каждого компонента и т. п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена схема и создана новая методика полиэнергетического томографического сканирования с помощью серии сдвинутых конических проекций, которая позволила создать на рентгенооптическом ПЗС-детекторе устройство для наблюдения процесса насыщения флюидами пористого образца. В расчетах учтены точные спектральные характеристики излучателя, детектора и исследуемых сред, что уменьшило количество калибровок, увеличило точность и надежность измерений концентраций для каждого компонента флюида. Все это достигнуто без усложнения постановки эксперимента, за счет использования современных средств регистрации и обработки изображений. Необходимые численные расчеты были проведены на обычном офисном компьютере. Большое число точек в выборке при обработке массивов двумерных изображений и большой объем образца при измерениях рентгеновской плотности позволяют даже при одномерном представлении данных уменьшить шум и увеличить точность измерений.

Разработанные методики и программы протестированы на объектах стандартной формы и состава.

Эксперименты с применением разработанной методики измерений показали, что просачивание смеси жидкостей через пористые образцы сопровождается сильными флуктуациями распределения концентраций и скорости фронта просачивания в пространстве, величина которых возрастает с увеличением размерности задачи.

Полученные в работе результаты показали достоинства и перспективность использования двумерных ПЗС-матриц с системой оцифровки изображений при создании измерительных комплексов для изучения динамики течения многофазных жидкостей в пористых средах.

При выполнении работы был использован большой идейный и программно-аналитический задел, созданный в ИГиЛ СО РАН и научно-образовательном центре “ЮКОС-Новосибирск” в составе НИЧ НГУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Vinegar H. J.** X-ray CT and NMR imaging of rocks // *J. Petrol. Technol.* 1986. V. 38, N 3. P. 257–259.
2. **Sprunt E. S., Desal K. P., Coles M. E., et al.** CT-scan-monitored electrical-resistivity measurements show problems achieving homogeneous saturation // *SPE Formation Evaluation.* 1991. V. 6, N 3. P. 134–140.
3. **Tidwell V. C., Glass R. J.** X-ray visible light transmission for laboratory measurement of two-dimensional saturation fields in thin-slab systems // *Water Resour. Res.* 1994. V. 30, N 11. P. 2873–2882.

4. **Coretest Systems, Inc.** (2005). The XRSC-198 two or three-phase X-ray core flood scanning system. 400 Woodview Av., Morgan Hill, CA 95037, USA. <http://www.coretest.com/pdf/xrsc-198.pdf>.
5. **Core Laboratories** (2005). AXRP-300 automated X-Ray relative permeability system. 2015 McKenzie, Suite 106, Carrollton, Texas, 75006, USA. http://www.corelab.com/coreinst/pdf/advanced_rock/axrp-300.pdf.
6. **Sharma B., Brigham W., Castanier L.** CT imaging techniques for two-phase and three-phase *insitu* saturation measurements // SUPRI TR 107 Report. US Dep. of Energy, June 1997. Contract N DE-FG22-96BC14994.
7. **Janesick J. R.** Large-area scientific CCDs — from memory device to imager // OE Reports. N 110. Feb. 1993. Bellingham, WA, USA: SPIE — The Intern. Soc. for Optical Engng.
8. **Васильев В. Н., Лебедев Л. А., Сидорин В. П., Ставицкий Р. В.** Спектры излучения рентгеновских установок. М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. **Романов А. И.** Экспериментальное изучение спектров излучения импульсных рентгеновских аппаратов для регистрации динамических процессов в неоднородных средах: Квалиф. работа ... бакалавра. Новосиб. гос. ун-т, 2003.
10. **Sundararaman V., Prasad M. A., Vora R. B.** Computed spectra from diagnostic and therapeutic X-ray tubes // Phys. Med. Biol. 1973. V. 18, N 2. P. 208–218.
11. **Bichenkov E. I., Ovsianikov V. L., Palchikov E. I.** Dose and duration measurement of X-ray flash dependent on discharge circuit parameters // Proc. of the XI Intern. symp. on discharge and electrical insulation in vacuum. Berlin, DDR, 24–28 Sept., 1984. Berlin: ISDEIV, 1984. V. 2. P. 451–454. <http://isdeiv.lbl.gov>
12. **National Institute of Standards and Technology** (2005). Attenuation and absorption spectra for various media. Gaithersburg, MD, USA. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/>
13. **Бартули Е. Р., Бурлев А. Ю., Пальчиков Е. И., Сухинин С. В.** Измерение динамики пространственного распределения флюида в пористом образце методом цифровой рентгенографии // Динамика сплошной среды / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 2002. Вып. 121. С. 56–69.
14. **Besov A. S., Schemelinin Y. A., Palchikov E. I., et al.** Researching the dynamics of movement of gas-liquid mixture in a porous medium by means of low-angle tomography // Proc. of the V Intern. conf. on multiphase flow (ICMF-2004), Yokohama, Japan, 30 May — 4 June, 2004. The University of Tokyo. 2004. P. 106. CD-ROM Proc. Paper N 140.
15. **Пальчиков Е. И.** Рентгенографическое наблюдение фильтрации жидкости через нефтеносную породу // ПМТФ. 1997. Т. 38, № 6. С. 169–177.
16. **Palchikov E. I., Sukhinin S. V., Burlev A. Yu., et al.** X-ray tomographic flow visualization of multiphase fluid mixture in porous media // Proc. of the VII Triennial intern. symp. on fluid control, measurement and visualization (FLUCOME'03), Sorrento, Italy, 25–28 Aug., 2003. CD-ROM Proc. ISBN 0-9533991-4-1. Paper N 101. Publ. Optimage Ltd, Edinburgh University, UK, EH10 5PJ. <http://www.vsj.or.jp/jov/Vol17No2/Carlomagno.htm>.

Поступила в редакцию 16/IX 2004 г.