

# *Машины, оборудование и обустройство промыслов*

---

## *Machinery, equipment and field construction*

2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений  
(технические науки)

УДК 53.083.8

DOI: 10.31660/0445-0108-2022-2-98-111

### **Разработка концепта мультифазного расходомера**

**Н. А. Шулаев, С. Г. Никулин, Р. Б. Аубакиров, Я. В. Пурицкис\*,  
К. А. Мотаев**

*Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия  
\*380ntgck@gmail.com*

**Аннотация.** В нефтегазовой промышленности можно выделить несколько проблем, которые влияют на развитие отрасли: низкое качество нефтепродуктов и малые темпы применения новых технологий, что непосредственно отражается на экономической составляющей производства. В настоящее время ведутся разработки мультифазных расходомеров, однако создание универсального прибора до сих пор является нерешенной задачей, а существующие разработки требуют постоянных калибровок на месторождениях. Основной проблемой при расчете расхода флюида является определение процентного содержания компонент в проходящей смеси. Использование излучения рентгеновского диапазона позволяет решить большинство технических проблем, а также определить состав с достаточно высокой точностью. Расходомеры, использующие данную концепцию, малоприменимы.

Целью исследования является теоретическое обоснование применимости излучения рентгеновского диапазона в определение состава проходящего потока.

В ходе выполнения работы были проведены поиск и анализ табличных данных, характеризующих взаимодействие излучения с веществом. В результате были определены приемлемые источники характеристического излучения. Следующим шагом мы смоделировали структуру флюида и вывели систему уравнений, с помощью которой можно определить плотности, совместно с существующими приборами, а также коэффициентов, определяемых экспериментальным путем. Результатом исследования является решаемая система уравнений, а также первичное моделирование рассматриваемой газожидкостной смеси при ламинарном течении. Итогом проведенной работы является получение теоретического подтверждения актуальности использования прибора, основывающегося на данной концепции, последующее добавление детекторов характеристического излучения поможет определить химический состав флюида.

**Ключевые слова:** коэффициент ослабления, моделирование, мультифазный расходомер, интенсивность, рентгеновское излучение, процентное содержание, флюид

**Для цитирования:** Разработка концепта мультифазного расходомера / Н. А. Шулаев, С. Г. Никулин, Р. Б. Аубакиров [и др.]. – DOI 10.31660/0445-0108-2022-2-98-111 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2022. – № 2. – С. 98–111.

### **Development of the concept of a multiphase flow meter**

**Nikita A. Shulaev, Sergey G. Nikulin, Rustam B. Aubakirov,  
Janis V. Puritskis\*, Kirill A. Motaev**

**Abstract.** In the oil and gas industry, several problems can be identified that affect the subsequent rates of development of the relevant industry: low quality of oil products and low rates of application of new technologies, which directly slows down the country's economic component. Currently, the development of multiphase flow meters is underway, however, the creation of a universal device is still an unsolved problem, and the existing developments require calibrations. The main problem in calculating the flow rate of the fluid is the determination of the density of the components of the passing mixture. The use of X-ray radiation allows you to solve most of the technical problems, as well as to determine the density with a high accuracy. Flow meters using this concept are of little use.

The purpose of the study of our work is to update the applicability of the use of the X-ray range in determining the density of the passing flow. In the course of the work, a search and analysis of tabular data characterizing the interaction of radiation with matter was carried out, according to the results of which acceptable sources of characteristic radiation were determined. In the next step, we modeled the structure of the fluid and derived a system of equations that allows one to determine the densities using existing instruments, as well as constants that are determined experimentally.

The result of the research is a solvable system of equations, as well as primary modeling and determination of the component, quantitative composition of the gas-liquid mixture under consideration in laminar flow. The result of this work is to obtain a theoretical confirmation of the relevance of using the device based on this concept, the subsequent addition of characteristic radiation detectors will also help to determine the chemical composition of the fluid.

**Keywords:** attenuation factor, simulation, multiphase meter, intensity, x-ray, percentage, fluid

**For citation:** Shulayev, N. A., Nikulin, S. G., Aubakirov, R. B., Puritskis, J. V., & Motayev, K. A. (2022). Development of the concept of a multiphase flow meter. Oil and Gas Studies, (2), pp. 98-111. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2022-2-98-111

## **Введение**

В течение большого промежутка времени добывающая промышленность стремилась изобрести систему, которая бы могла обеспечить определение компонентного состава протекающего мультифазного потока через трубопровод в режиме реального времени, а также определять физические параметры для соответствующей газожидкостной смеси [1].

Разработка многофазного расходомера позволит точно описывать концентрацию и плотность каждой фазы флюида, протекающего по трубопроводу. Это ускорит технологический процесс по анализу данных и сепараций соответствующей фазы для последующей реализации товарной нефти по критериям рынка, а также позволит использовать все полезные ископаемые при переработке сырья.

В настоящее время уже получены конкретные исследования в этой области и большинство из существующих проблем решены. Однако использование СВЧ-излучения, которое сильно зависит от внешних факторов, и гамма-излучения, которое опасно, вследствие некорректной эксплуатации не выгодно. Альтернатива этим разработкам — использование рентгеновских трубок, которые, в свою очередь, сочетают в себе преимущества обеих концепций. Использование данного диапазона длин волн позволит достаточно точно описать характеристики исследуемого газожидкостного потока в трубопроводе.

Косвенный расчет характеристик потока, состоящего из двух и более фаз, сложен в моделировании, ввиду учета различных явлений и взаимодействия компонентов между собой, поэтому необходимо проводить прямые измерения плотностей и структур потока для объективного описания.

## Объект и методы исследования

### Источник рентгеновского излучения

Существует два типа рентгеновского излучения, получаемых искусственным путем. Одно из них можно получить в результате торможения электронов в электрическом поле, при этом энергия не квантуется, и, следовательно, мы получаем немонокроматическое, тормозное излучение. Можно получить второй тип рентгеновского излучения, основная энергия которого будет находиться в узком диапазоне длин волн. Если определенный атом облучить частицами высоких энергий, то электрон, выбитый из внутренней оболочки атома вследствие соударения, образует вакансию, которую займет электрон из внешней оболочки, при этом излучается фотон с энергией, равной разнице энергий между энергетическими уровнями — характеристическое излучение. У отдельного атома есть свой уникальный набор энергетических уровней, поэтому у каждого элемента различается частота рентгеновских лучей. Соответствующий тип излучения будет рассматриваться как основной источник информации о флюиде.

### Рентгеновские трубы

В настоящее время конструкция рентгеновских трубок мало отличается от предшествующих моделей и представляет собой электронную лампу, обладающую высоким напряжением. Основными элементами устройства является корпус, имеющий окно, состоящее из слабо поглощающего материала, катод — источник электронов, на него обычно подается высокий потенциал, и анод, на котором происходит торможение заряженных частиц, материал последнего определяет спектральный состав рентгеновского излучения и содержит тормозную и характеристическую составляющие. Для спектральной интенсивности излучения, испускаемого рентгеновской трубкой, можно записать выражение [2, 3]

$$I(\lambda) = (I_\lambda + \sum_i v(\lambda - \lambda_i) I_i \exp(-\mu_{Be}(\lambda) \rho_{Be} d_{Be})), \quad (1)$$

где  $v(\lambda - \lambda_i)$  — функция, принимающая значение 1 при  $\lambda = \lambda_i$  и значение 0 при всех прочих  $\lambda$ ;  $\mu_{Be}$  — массовый коэффициент поглощения излучения с длиной волны  $\lambda$  в бериллии;  $\rho_{Be}$  — его плотность;  $d_{Be}$  — толщина бериллиевого окна.

При теоретическом моделировании спектральной интенсивности трубок с помощью зависимости (1) необходимо знать соотношение тормозной  $I_\lambda$  и характеристической  $I_i$  составляющей рентгеновского излучения.

Для оценки зависимости соотношения интенсивностей характеристической и тормозной составляющих первичного рентгеновского излучения от атомного номера материала анода и напряжения на рентгеновской трубке предложена формула [4]

$$N_\lambda = AZ\left(\frac{\frac{\lambda}{\lambda_0}-1}{\lambda^2}\right), \quad (2)$$

где А — константа, определяемая из эксперимента; Z — атомный номер элемента, на котором происходит рассеяние.

Используя теоретический материал из работы В. Г. Павлинского [4], перепишем выражение (3), проведя анализ для тормозного излучения: «поскольку нас интересует спектральная интенсивность тормозного излучения, соответствующая линии i характеристического спектра, то в этом уравнении следует принять, что  $\lambda = \lambda_i$ . Тогда  $\lambda/\lambda_0 = \lambda_i/\lambda_0$ , или, считая в первом приближении, что  $\lambda_i \approx \lambda_q$ , (где  $\lambda_q$  — длина волны, соответствующая энергии связи электронов q-оболочки), получаем, что  $\lambda/\lambda_0 \approx \lambda_q/\lambda_0 = V_0/V_q = U_0$ ». То есть

$$N_\lambda \approx AZ \frac{U_0 - 1}{\lambda_i^2} R f(\chi). \quad (3)$$

Из уравнения (3) можно сделать следующие выводы:

- 1) контрастность характеристических линий быстро падает с ростом атомного номера материала анода;
- 2) контрастность растет с ростом напряжения на рентгеновской трубке.

#### *Виды коэффициентов поглощения*

Есть три вида коэффициента поглощения: электронный, частичный, атомный коэффициент поглощения [5–7]. Кратко рассмотрим каждый из них.

Электронный коэффициент представляет собой вероятность поглощения пучка рентгеновского излучения сечением 1 см<sup>2</sup> одним электроном атома, расположенного в пределах этого сечения. Размерность этого коэффициента, см<sup>-2</sup>

$$\tau_e = \frac{W_T/T}{I} = \frac{\pi^3 e^2 R^2 (\bar{E})^2}{2mc^2 n^4 \bar{E}^2} Z^4 \lambda^3 = C \lambda^3 Z^4, \quad (4)$$

где  $\frac{(\bar{E})^2}{\bar{E}^2} = \frac{8}{\pi^2}$  — постоянная величина.

Из выражения (4) можно заметить, что зависимость электронного коэффициента поглощения пропорциональна длине волны в третьей степени ( $\lambda^3$ ) и зарядовому числу поглощающего вещества в четвертой степени ( $Z^4$ ).

Частичный коэффициент истинного поглощения  $\tau_q$  для некоторой оболочки вещества  $q$  определяется выражением (4), прямо пропорционален количеству электронов  $n_q$  данной оболочки, таким образом, коэффициент можно записать как  $\tau_e n$ .

Для атомного коэффициента истинного поглощения  $\tau_a$  при условии  $\lambda < \lambda_k$  справедливо выражение

$$\tau_a = \tau_K + \tau_{L1} + \tau_{L2} + \dots = (C_K + C_{L1} + C_{L2} + \dots) \lambda^3 Z^4 = C_a \lambda^3 Z^4. \quad (5)$$

Следует обратить внимание на то, что атомный коэффициент истинного поглощения, равно как электронный и частичный, имеет размерность  $[\tau_a] = \text{см}^2$ . Иными словами, атомный коэффициент истинного поглощения представляет собой поперечное сечение, в пределах которого рентгеновское излучение обязательно поглотится атомом.

В общем случае для процесса взаимодействия получается сложное выражение, определяющее число случаев  $dW/dt$  поглощения рентгеновских фотонов некоторой оболочкой атома в единицу времени. После некоторых упрощений для частичного коэффициента поглощения рентгеновских фотонов К-оболочкой найдена простая зависимость [4]

$$\tau_K = 32\lambda r_o \left(\frac{4}{3}\right) \left(\frac{\lambda}{\lambda_K}\right)^{\frac{5}{2}} f(\xi), \quad (6)$$

где  $r_o$  — длина томсоновского рассеяния.

Переменная  $(\xi)$ , введенная Штоббе

$$\xi \approx \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_K - \lambda}}. \quad (7)$$

Общее действие этих процессов в основном определяется ослаблением рентгеновского излучения в веществе. Атомный коэффициент ослабления получается из суперпозиций  $\tau_a$  — атомного коэффициента поглощения и  $\sigma_a$  — атомного коэффициента рассеивания

$$\mu_a = \tau_a + \sigma_a. \quad (8)$$

Когда атомный номер вещества  $Z > 20$ , то рассеиванием можно пренебречь, в остальных случаях его нужно учитывать. В нашем случае им пренебрегать нельзя.

Ослабление интенсивности излучения определяется

$$I_x = I_0 \exp(-\mu_x x), \quad (9)$$

$$\mu_x = \rho \mu_m,$$

где  $\mu_x$  — линейный коэффициент ослабления.

Линейный коэффициент не всегда удобно использовать, для этого придумали массовый коэффициент ослабления  $\mu_m$ .

$$I_x = I_0 \exp(-\mu_m \rho_s x), \quad (10)$$

где  $\rho_s = \rho x$  — поверхностная плотность поглощающегося вещества.

#### *Детектор рентгеновского излучения*

Существует два вида детекторов рентгеновского излучения: визуализация и измерение дозы излучения. Рассмотрим каждый из них [4].

Детекторы, которые могут измерять дозу облучения, такие как счетчик Гейгера, ионизационные камеры и дозиметры. С их помощью можно будет регистрировать интенсивность рентгеновского излучения, проходящего через вещество. Единственное, что необходимо, это большая разрешающая способность таких счетчиков и высокая чувствительность, малое мертвое время. Данный процесс можно продолжать длительное время.

Детекторы, построенные на визуализации распределения интенсивности рентгеновского излучения, такие как фотопластины, люминофорные пластины и полупроводниковые детекторы, применимы, так как могут дать информацию об интенсивности излучения, но имеют ряд ограничений, связанных с постоянным мониторингом потока жидкости и газа [8].

Вопрос о том, что нужно использовать, остается актуальным, тут все зависит от программного обеспечения и особенностей каждого из детекторов.

## **Результаты и обсуждение**

### *Постановка задачи и допущения*

С использованием рентгеновского излучения возможно создать расходомер [9, 10]. Для доказательства этой теории обратимся к теоретической составляющей, описывающей взаимодействие излучения с веществом. А конкретно изучим его свойства и проникающие способности.

Рассматривая формулу Ламберта — Бугера — Бера [11], можно понять, что интенсивность излучения будет уменьшаться. В формуле фигурирует показатель ослабления интенсивности, который включает в себя поглощение и рассеивание света. Когда атомный номер элемента больше 20, рассеиванием пренебрегают. В нашем случае им пренебрегать нельзя, так как атомный номер основных исследуемых элементов меньше 20. Теория показывает, что для нашей задачи существует необходимая длина волны, при которой можно различить все элементы, находящиеся во флюиде; в этом мы убедимся ниже. Необходимо в формуле Ламберта — Бугера — Бера учесть и количество вещества, через которое пройдет излучение, ведь оно тоже даст соответствующий вклад.

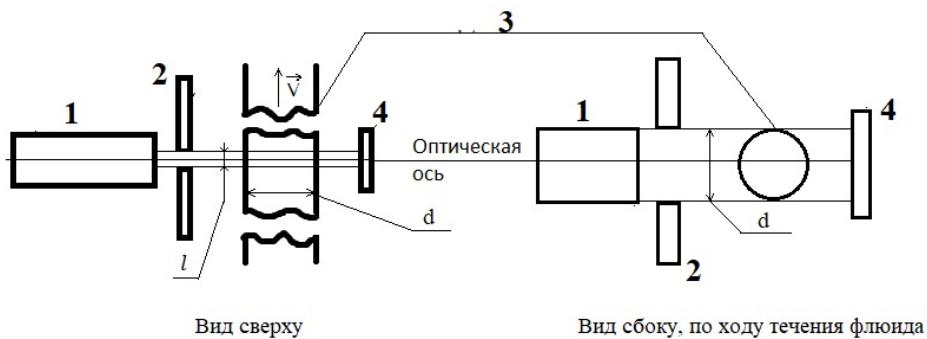
Из информации о составе флюида на разных месторождениях можно сделать вывод, что количество примесей незначительно<sup>1</sup>, а большую часть по объему составляет углерод [12, 13]. И, соответственно, необходимо подобрать такую длину волны, при которой поглощение будет минимально для углерода. Результатом выбора будут экономия энергии и более точные расчеты.

При постановке задачи необходимо ввести допущения, учитывающие основные факторы, влияющие на экспериментальные результаты. А также необходимо рассмотреть геометрию, характерную для поставленной задачи.

---

<sup>1</sup> Большая Российская энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bigenc.ru/geology/text/4010811>.

Работа установки основывается на схеме, приведенной на рисунке 1.



*Рис. 1. Работа установки: 1 — источник рентгеновских лучей; 2 — коллиматор; 3 — сечение трубы; 4 — регистратор интенсивности*

Принцип работы устройства основывается на поглощении, рассеянии и переизлучении электромагнитных волн рентгеновского диапазона

$$\lambda = 10^2 \sim 10^{-3} \text{ нм.} \quad (11)$$

В общем случае  $\mu$  — коэффициент ослабления излучения, включает в себя зависимость от многих параметров, основной вклад при этом вносят рассеяние и поглощение на определенной частоте излучения. В свою очередь, эти процессы зависят от интенсивности излучения, структуры, состава вещества и т. д. Немаловажным фактором является характеристическое излучение, являющееся следствием переизлучения веществом кванта энергий со своим характерным спектром, по которому можно судить о химическом составе вещества и флюктуации плотности.

Таким образом, коэффициент  $\mu$  можно представить в виде функции от многих параметров:

$$\mu = \mu (\lambda, F_1, F_2, F_3, \dots, F_n). \quad (12)$$

При постановке задачи ограничимся рассмотрением коэффициента ослабления  $\mu$ , зависимым только от поглощения излучения на фиксированной длине волны, то есть будем считать, что падающая на вещество волна является монохроматической, а остальными факторами мы пренебрегаем. Их влияние можно рассмотреть, как позже включив их в  $\mu$ . Значения массовых коэффициентов ослабления в длинноволновой области света от длины волны излучения можно определить из таблицы.

Приведенная таблица была получена путем анализа данных [14, 15]. Критерием выбора является возможность создания электродов из элемента источника (верхняя строка таблицы). Наличие коэффициента ослабления для элементов, входящих в состав флюида (левый столбец).

**Массовые коэффициенты ослабления в длинноволновой  
области рентгеновского спектра**

Элемент	Cu	C	Zr	Fe	Be
Линия	La	Kα	M\xi	La	Kα
λ, Å	13,34	44,7	81,1	17,59	114
H	0,02	0,66	3,6	—	12
C	2,51	45	11,05	5,59	21,2
N	4,3	3,94	16,2	7,89	36,5
O	5,3	6,25	26	10	56
Ar	4,07	45,6	11,1	7,1	19,5
Fe	7,86	10,8	41	—	59
Ni	8,81	49,8	—	—	—

Анализ таблицы показывает, что оптимальным элементом для наших целей является Cu, обладающий относительно низким массовым коэффициентом для характерных элементов. А также данная длина волны позволяет различить основные входящие элементы.

Следующим вводимым нами допущением является то, что лучи, исходящие из источника, при прохождении через коллиматор, являются параллельными. Это является следствием того, что длина волны излучения  $\lambda \sim 10^{-7}$  м существенно меньше размера щели  $l \sim 10^{-3}$  м, расхождение составляет по меньшей мере 4 порядка, поэтому явлением дифракции на щели мы пренебрегаем, более того, характерный размер исследуемой области мал, по сравнению с углом расхождения луча, что говорит о верности допущения.

Одной из важных особенностей рентгеновского излучения является то, что коэффициент преломления близок к единице, однако меньше его.

Дело в том, что частоты электромагнитных колебаний для рентгеновского диапазона значительно больше частот собственных колебаний электронов в атомах и, следовательно, в формуле (без учета затухания) [15]

$$n^2 - 1 = \frac{4\pi Ne^2}{m \cdot (\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (13)$$

При этом частотой колебаний атомов в веществе можно пренебречь, тогда

$$n^2 = 1 - \frac{4\pi Ne^2}{m\omega^2}. \quad (14)$$

Считая, что  $\omega^2$  — велико, то можно считать, что отличие коэффициента преломления мало отлично от единицы  $n = 1-10^{-6}$ . Поэтому отклонением от прямолинейного распространения света при прохождении его через границу раздела двух сред мы пренебрегаем.

А также не учитываем дифракцию внутри вещества, так как для газожидкостной смеси отсутствует какая-либо атомная решетка, следовательно, отсутствует четкая периодичность структуры вещества.

В общем случае геометрия задачи сводится к нахождению количества элементарных структур заданного размера, условные ячейки или «пиксели» в срезе трубы. Данное приближение является технически обоснованным в силу того, что регистрация проходящего излучения производится при помощи фотоматриц, имеющих характерные размеры  $\sim 10^{-3}$  мм.

Кроме того, считаем, что некоторые данные и физические величины мы можем получать с помощью других приборов, поэтому при решении задачи можно не ограничиваться в уравнениях.

При первоначальном решении полагаем, что детектор регистрирует излучение настолько быстро, что смещение вещества внутри трубы не происходит в процессе регистрации интенсивности излучения.

Резюмируя вышесказанное, можно выделить следующие допущения:

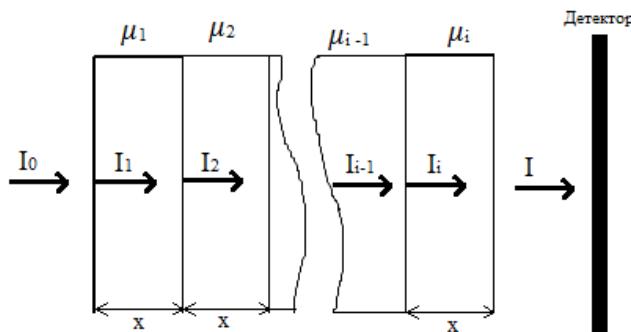
- 1)  $\mu$  зависит только от коэффициента поглощения вещества, другими явлениями, связанными с взаимодействием рентгеновского излучения с веществом, пренебрегаем;
- 2) преломлением света при прохождении через вещество пренебрегаем;
- 3) рассматриваем систему в дискретном виде;
- 4) рассматриваем стационарную задачу;
- 5) флюид состоит только из трех фаз, физические свойства которых определяются усреднением этих величин для каждого компонента, входящего в состав фазы;
- 6) рассматриваемый поток является эмульсионным.

#### *Основные формулы и законы*

Как и для любого другого излучения, поглощение электромагнитной волны в среде, в зависимости от расстояния, пройденного ею в среде, описывается законом Бугера — Ламберта — Бера [11]:

$$I = I_0 e^{-\mu x}. \quad (15)$$

Как уже говорилось в допущениях, рассматриваем только монохроматическое излучение, поэтому интенсивность характерна только для этой длины волны.



*Рис. 2. Ослабление света при прохождении через слои вещества*

При этом в формуле Бугера — Ламберта — Бера  $I_0$  для второго слоя будет являться интенсивностью, оставшейся после прохождения первого слоя. Таким образом, при выходе из второго слоя уравнение примет вид

$$I_2 = I_1 e^{-\mu_2 x} = I_0 e^{-\mu_1 x} e^{-\mu_2 x} = I_0 e^{-(\mu_1 + \mu_2)x}. \quad (16)$$

При дальнейшем рассмотрении всех слоев итоговая интенсивность, приходящая на детектор, будет равна

$$I = I_0 e^{-x \sum_{n=1}^i \mu_i}. \quad (17)$$

Откуда можно выразить сумму  $\mu_i$

$$-\frac{\ln \frac{I}{I_0}}{x} = \sum_{n=1}^i \mu_i. \quad (18)$$

Учитывая, что флюид состоит из 3 фаз, для каждой из которых определен свой коэффициент ослабления, таким образом,  $\sum_{n=1}^i \mu_i$  можно разбить на 3 слагаемых, каждое из которых характеризует соответствующую фазу

$$-\frac{\ln \frac{I}{I_0}}{x} = \mu_h \sum_{n=1}^m n^h + \mu_g \sum_{n=1}^k n^g + \mu_w \sum_{n=1}^z n^w. \quad (19)$$

Выполнив суммирование, получим следующее уравнение:

$$\Delta = \mu_h m_h + \mu_g k_g + \mu_w z_w, \quad (20)$$

где  $\Delta = -\frac{\ln \frac{I}{I_0}}{x}$ ,  $m_h$ ,  $k_g$ ,  $z_w$  — число ячеек, занимаемое, соответственно, нефтью, газом, водой;  $\mu_h$ ,  $\mu_g$ ,  $\mu_w$  — коэффициенты ослабления для нефти, газа, воды.

Формула (10) показывает зависимость результирующего коэффициента ослабления от количества ячеек занимаемой каждой фазой в одной строке, выделенного нами слоя в постановке задачи.

Если рассматривать все строки, то можно составить следующую систему из  $i$  уравнений [16, 17]:

$$\begin{cases} \mu_h m_{h1} + \mu_g k_{g1} + \mu_w z_{w1} = \Delta_1 \\ \mu_h m_{h2} + \mu_g k_{g2} + \mu_w z_{w2} = \Delta_2 \\ \vdots \\ \mu_h m_{hi} + \mu_g k_{gi} + \mu_w z_{wi} = \Delta_i \end{cases}, \quad (21)$$

где  $\Delta_i = -\frac{\ln \frac{I_i}{I_0}}{x}$ .

Суммируя все уравнения каждого исследуемого слоя и деля их на число всех ячеек  $N$  в рассматриваемой области, система перепишется в виде

$$\mu_{\text{H}}\varepsilon_{\text{H}} + \mu_{\text{Г}}\varepsilon_{\text{Г}} + \mu_{\text{B}}\varepsilon_{\text{B}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^i \Delta_j. \quad (22)$$

Учитывая, что мы используем плоский детектор, правая часть определяется по формуле (22)

$$\sum_{j=1}^i \Delta_j = \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^i -\frac{\ln \frac{I_{jk}}{I_o}}{x}, \quad (23)$$

где  $s$  — число слоев;  $i$  — число строк в каждом слое.

Уравнение (24) является линейным относительно содержания, которое нам необходимо найти. В системе фигурируют три неизвестных, поэтому необходимо дополнить решение еще двумя уравнениями. Для этого воспользуемся законом сохранения массы, а также тем фактом, что суммарное относительное количество вещества в системе равно 1, в итоге дополнительные уравнения имеют вид

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{H}} + \varepsilon_{\text{Г}} + \varepsilon_{\text{B}} = 1 \\ V\rho_{\text{H}}\varepsilon_{\text{H}} + V\rho_{\text{Г}}\varepsilon_{\text{Г}} + V\rho_{\text{B}}\varepsilon_{\text{B}} = m \end{cases}, \quad (24)$$

где  $V$  — объем исследуемой области;  $m$  — суммарная масса исследуемой области;  $\rho_{\text{H}}, \rho_{\text{Г}}, \rho_{\text{B}}$  — соответствующие характерные плотности каждой фазы.

Решением задачи при введенных нами допущениях является система (24)

$$\begin{cases} \mu_{\text{H}}\varepsilon_{\text{H}} + \mu_{\text{Г}}\varepsilon_{\text{Г}} + \mu_{\text{B}}\varepsilon_{\text{B}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^i \Delta_j \\ \varepsilon_{\text{H}} + \varepsilon_{\text{Г}} + \varepsilon_{\text{B}} = 1 \\ V\rho_{\text{H}}\varepsilon_{\text{H}} + V\rho_{\text{Г}}\varepsilon_{\text{Г}} + V\rho_{\text{B}}\varepsilon_{\text{B}} = m \end{cases}. \quad (25)$$

Сложная сумма описывает соотношение интенсивностей, приходящихся на всю фотоматрицу. Поэтому уменьшение размера регистрирующего пикселя влечет за собой усложнения расчетов, но при этом повышает точность выходных данных. Это является важным для нас, поэтому система уравнений (25) в полной мере описывает явления, происходящие в нашей задаче с учетом введенных нами допущений.

### Выводы

В ходе выполнения работы были сделаны следующие выводы.

- Рассматриваемые нами допущения хоть и не учитывают все особенности взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, но позволяют составить систему уравнений, учитывающую основные особенности. Данная система является решаемой методом Крамера или другим.
- Выбранный нами способ дискретизации позволяет с достаточной точностью учитывать все компоненты, входящие в состав флюида.

- Параметры, входящие в уравнения, должны быть определены достаточно точно, что требует разработки соответствующих методик, однако этого можно избежать, если собрать достаточные статистические данные при работе с различными флюидами в области рентгеновского диапазона. Следующим шагом в нашей работе будет проведение исследований в рентгеновском диапазоне. Это позволит выявить новые особенности во взаимодействии и набрать статистические данные.

В дальнейшем планируется избавиться от ряда допущений и произвести переход к нестационарному эмульсионному [19] режиму потока, который присутствует при движениях газожидкостной смеси в горизонтально расположенной трубе [20] при малых значениях скорости движения флюида.

#### **Список источников**

1. Брилл, Дж. П. Многофазный поток в скважинах / Дж. П. Брилл, Х. Мукерджи ; перевод с английского Ю. В. Русских ; под редакцией М. Н. Кравченко. – Ижевск : Ин-т компьютерных исследований, 2006. – 384 с. – Перевод изд.: Multiphase Flow in Wells / James P. Brill, Hemanta Mukherjee. Richardson, 1999. – Текст : непосредственный.
2. Блохин, М. А. Физика рентгеновских лучей / М. А. Блохин. – 2-е изд., перераб. – Москва : Гостехиздат, 1957. – 518 с. – Текст : непосредственный.
3. Блохин, М. А. Рентгеновское излучение / М. А. Блохин. – Текст : непосредственный // Физическая энциклопедия : [в 5 т.] / Гл. ред. А. М. Прохоров. – Москва : Большая российская энциклопедия, 1994.
4. Павлинский, Г. В. Основы физики рентгеновского излучения / Г. В. Павлинский. – Москва : Физматлит, 2007. – 240 с. – Текст : непосредственный.
5. Русаков, А. А. Основы рентгенографии металлов : в 3 частях. Часть 1 / А. А. Русаков, В. Н. Яльцев. – Москва : МИФИ, 1994. – 172 с. – Текст : непосредственный.
6. Русаков, А. А. Основы рентгенографии металлов: в 3 частях. Часть 2 / А. А. Русаков, В. Н. Яльцев. – Москва : МИФИ, 1994. – 60 с. – Текст : непосредственный.
7. Русаков, А. А. Основы рентгенографии металлов : в 3 частях. Часть 3 / А. А. Русаков, В. Н. Яльцев. – Москва : МИФИ, 1994. – 152 с. – Текст : непосредственный.
8. Рид, Р. С. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд ; перевод с английского, под ред. Б. И. Соколова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Химия : Ленингр. отделение, 1982. – 592 с. – Перевод изд.: The properties of gases and liquids / Robert C. Reid, John M. Prausnitz, Thomas K. Sherwood. New York etc., 1977. – Текст : непосредственный.
9. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель ; перевод с английского А. А. Гусева и А. В. Пахнева ; под общей редакцией А. А. Гусева. – Москва : Наука, 1978. – 792 с. – Перевод изд.: Introduction to solid state physics / Charles Kittel. New York, 1976. – Текст : непосредственный.
10. Звонарев, С. В. Основы математического моделирования : учебное пособие / С. В. Звонарев. – Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2019. – 112 с. – Текст : непосредственный.
11. Ландсберг, Г. С. Оптика : учебное пособие / Г. С. Ландсберг. – 6-е изд., стер. – Москва : Физматлит, 2003. – 848 с. – Текст : непосредственный.
12. Плотникова, И. Н. Элементный состав нефти и рассеянного органического вещества и методы его изучения : учебно-методическое пособие / И. Н. Плотникова ; Казанский (Приволжский) федеральный университет. – Казань : Казанский университет, 2012. – 25 с. – Текст : непосредственный.
13. Чеников, И. В. Химия и физика нефти : учебное пособие / И. В. Чеников ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Кубанский государственный технологический университет. – Краснодар : КубГТУ, 2010. – 292 с. – Текст : непосредственный.
14. Блохин, М. А. Рентгеноспектральный справочник / М. А. Блохин, И. Г. Швейцер. – Москва : Наука, 1982. – 376 с. – Текст : непосредственный.
15. Ракобольская, И. В. Ядерная физика / И. В. Ракобольская. – Москва : Изд-во Московского ун-та, 1971. – 296 с. – Текст : непосредственный.

16. Кузнецов, Д. С. Специальные функции : учебное пособие / Д. С. Кузнецов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1965. – 423 с. – Текст : непосредственный.
17. Ильин, В. А. Линейная алгебра : учебник / В. А. Ильин, Э. Г. Позняк. – 4-е изд. – Москва : Наука. Физматлит, 1999. – 296 с. – Текст : непосредственный.
18. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах / В. А. Мамаев, Г. Э. Одisha-рия, Н. И. Семенов, А. А. Тошибин. – Москва : Недра, 1969. – 208 с. – Текст : непосредственный.
19. Toski, E. Evolution of multiphase flow measurements and their impact on operational management / E. Toski, B. V. Hansen, D. Smith. – Schlumberger, 2003.

### **References**

1. Brill, J. P., & Mukherjee, H. (1999). Multiphase Flow in Wells. Richardson, Texas, First Printing Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, 150 p. (In English).
2. Blokhin, M. A. (1957). Fizika rentgenovskikh luchey. Moscow, Gostekhizdat Publ., 518 p. (In Russian).
3. Blokhin, M. A. X-ray radiation (1994). Physical encyclopedia : [in 5 volumes]. Moscow, Great Russian Encyclopedia Publ. (In Russian).
4. Pavlynskiy, G. V. (2007). Osnovy fiziki rentgenovskogo izlucheniya. Moscow, Fizmatlit Publ., 240 p. (In Russian).
5. Rusakov, A. A., & Yaltsev, V. N. (1994). Osnovy rentgenografii metallov: v 3 chastyah. Chast' 1. Moscow, MIFI Publ., 172 p. (In Russian).
6. Rusakov, A. A., & Yaltsev, V. N. (1994). Osnovy rentgenografii metallov: v 3 chastyah. Chast' 2. Moscow, MIFI Publ., 60 p. (In Russian).
7. Rusakov, A. A., & Yaltsev, V. N. (1994). Osnovy rentgenografii metallov: v 3 chastyah. Chast' 2. Moscow, MIFI Publ., 152 p. (In Russian).
8. Reed, R., Prausnitz, J., & Sherwood, T. (1977). The properties of gases and liquids. New York etc., 592 p. (In English).
9. Kittel, Ch. (1976). Introduction to solid state physics. New York, 792 p. (In English)
10. Zvonarev, S. V. (2019). Osnovy matematicheskogo modelirovaniya. Ekaterinburg, Ural University Publ., 112 p. (In Russian).
11. Landsberg, G. S. (2003). Optika, 6<sup>th</sup> edition. Moscow. Fizmatlit Publ., 848 p. (In Russian).
12. Plotnikova, I. N. (2012). Elementnyy sostav nefti i rasseyannogo organiceskogo veshchestva i metody ego izucheniya. Kazan, Kazan University Publ., 25 p. (In Russian).
13. Chenikov, I. V. (2010). Khimiya i fizika nefti. Krasnodar, Kuban State University Publ., 292 p. (In Russian).
14. Blokhin, M. A., & Shveytser, I. G. (1982). Rentgenospektral'nyy spravochnik. Moscow, Nauka Publ., 376 p. (In Russian).
15. Rakobol'skaya, I. V. (1971). Yadernaya fizika. Moscow, Moscow University Publ., 296 p. (In Russian).
16. Kuznetsov, D. S. (1965). Spetsial'nye funktsii. 2<sup>nd</sup> edition, revised and expanded. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 423 p. (In Russian).
17. Il'in, V. A., & Poznyak, E. G. (1999). Lineynaya algebra. 4<sup>th</sup> edition. Moscow, Nauka. Fizmatlit Publ., 296 p. (In Russian).
18. Mamaev, V. A., Odishariya, G. E., Semenov, N. I., & Tochigin, A. A. (1969). Gidrodinamika gazozhidkostnykh smesey v trubakh. Moscow, Nedra Publ., 208 p. (In Russian).
19. Toski, E., Hansen, B. V., & Smith, D. (2003). Evolution of multiphase flow measurements and their impact on operational management. Schlumberger. (In English).

### **Информация об авторах**

**Шулаев Никита Анатольевич,**  
студент, Тюменский государственный университет, г. Тюмень

### **Information about the authors**

**Nikita A. Shulaev, Student, Universi-**  
**ty of Tyumen**

**Никулин Сергей Геннадьевич,**  
заведующий базовой кафедрой расходо-  
метрии нефти и газа, Тюменский государ-  
ственный университет, г. Тюмень

**Аубакиров Рустам Бауржанович,**  
студент, Тюменский государственный  
университет, г. Тюмень

**Пурикис Янис Валдисович,**  
студент, Тюменский государственный  
университет, г. Тюмень, 380nmgck@  
gmail.com

**Мотаев Кирилл Анатольевич,**  
студент, Тюменский государственный  
университет, г. Тюмень

**Sergey G. Nikulin, Head of the Basic**  
**Department of Oil and Gas Flow Metering,**  
**University of Tyumen**

**Rustam B. Aubakirov, Student, Uni-**  
**versity of Tyumen**

**Janis V. Puritskis, Student, Universi-**  
**ty of Tyumen, 380nmgck@gmail.com**

**Kirill A. Motaev, Student, University**  
**of Tyumen**

Статья поступила в редакцию 13.01.2022; одобрена после рецензирования 14.02.2022;  
принята к публикации 28.02.2022.

The article was submitted 13.01.2022; approved after reviewing 14.02.2022; accepted for publica-  
tion 28.02.2022.