

УДК 622.691/.692:535.37:621.37+504.5

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СТРАТИФИКАЦИИ ГАЗОВ СКАНИРУЮЩИМ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ УТЕЧЕК ИЗ НЕФТЕПРОВОДА

А. Д. Алексеев¹, М. И. Ганиев², А. И. Дёмко^{2,3}, О. Ю. Семенов²

¹ПАО «Сургутнефтегаз», *ds950@mail.ru*

²Сургутский государственный университет,

³ООО «МИП БИТ»

mig17rw@yandex.ru, dai321@mail.ru, ous.tutor.phinma@mail.ru

В статье описана методика изучения стратификации газов сканирующим лазерным лучом. Предложен способ измерения концентрации газа методом углового отклонения луча лазера в стратифицированном потоке по изменению поперечного градиента концентрации и угла наклона границы стратификации в открытом резервуаре с нефтью. Обнаружена зависимость углового отклонения луча лазера от скорости разлива нефти. Проведены контрольные измерения распределения концентрации углеводородных газов.

Ключевые слова: стратификация, лазерный луч, газ, нефть, земная поверхность, нефтяные загрязнения, нефтепровод, диффузия, дистанционный метод.

METHOD OF TESTING GAS STRATIFICATION WITH SCANNING LASER RAY FOR DETECTING LEAKAGE FROM OIL PIPELINE

A. D. Alekseev¹, M. I. Ganiev², A. I. Demko^{2,3}, O. Yu. Semenov²

¹PSSC "Surgutneftegas", *ds950@mail.ru*

²Surgut State University,

³LLC "MIP BIT"

mig17rw@yandex.ru, dai321@mail.ru, ous.tutor.phinma@mail.ru,

The article describes the method of studying the stratification of gases with a scanning laser ray. An approach to measuring the concentration of gas is proposed. The method involves the angular deviation of a laser ray in a stratified flow through the change in the transverse gradient concentration and the angle of inclination of the stratification boundary in an open oil reservoir. The dependence of the angular deviation of the laser ray on the rate of the oil spill is found. Control measurements of the concentration distribution of hydrocarbon gases are carried out.

Keywords: stratification, laser ray, gas, oil, earth surface, oil contamination, oil pipeline, diffusion, remote method.

Среди веществ, загрязняющих окружающую среду, одно из первых мест принадлежит нефти и продуктам ее переработки. Основной причиной загрязнения окружающей среды нефтепродуктами является разгерметизация трубопроводов. Всего на территории Российской Федерации находится в эксплуатации около 350 тыс. км внутрипромысловых трубопроводов, на которых ежегодно отмечается свыше 50 тыс. опасных происшествий. На сегодняшний день обслуживающим персоналом не всегда удается эффективно выявлять утечки и оперативно реагировать на их устранение, что связано с климатическими и географическими особенностями, большой протяженностью трубопроводов, в результате чего окружающей среде наносится непоправимый ущерб от крупномасштабных разливов нефти. Постоянное сканирование трасс трубопроводов способствует своевременному обнаружению и локализации разливов нефти.

Представленная в работе методика измерения распределений плотности и концентрации в стратифицированных слоях нефти и газа является актуальной научно-технической задачей. Она связана с разработками новых методов обнаружения утечек горючих газов

и нефти вблизи нефтяных и газовых магистралей. В мировой практике существуют несколько методов исследования на наличие утечек углеводородного топлива с использованием спектрометрического метода определения нефтепродуктов в почве. Данные методы предусматривают использование оборудования, устанавливаемого на гражданские вертолеты или вездеходную спецтехнику. На сегодня становится актуальным использование малогабаритных приборов для обнаружения паров углеводородных топлив. С точки зрения практического применения стоит задача выбора метода обнаружения утечек нефтепродуктов, основными требованиями к которому являются надежность, практичность и экономичность.

Одним из эффективных способов измерения концентрации и плотности газа в стратифицированном слое является представленный авторами в работе метод определения показателя преломления по угловому отклонению луча лазера, проходящего через оптически неоднородность с поперечным по отношению к направлению луча градиентом [1]. Основной трудностью измерений в стратифицированном слое является неоднородность и несимметричность распределений плотности и показателя преломления среды, а также рельеф местности, по которой проложена трасса трубопроводов. Возможным решением этой задачи является использование известных закономерностей отклонения лазерного луча при прохождении через оптически неоднородность и получение новых данных распределений концентрации газов при вытекании нефтегазоводной смеси из поврежденного трубопровода. Для решения вопроса по обеспечению экологической безопасности рассмотрена задача дистанционного обнаружения утечек из нефтепроводов с низкой интенсивностью. Одним из вариантов системы дистанционного обнаружения утечек из газопроводов и нефтепроводов является система мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности по трассе нефтепроводов. При появлении утечки газа, нефти или нефтепродуктов углеводородные газы образуют облако газа над местом выхода углеводородного сырья, которое можно зафиксировать по отклонению лазерного луча.

Проведенный анализ литературы позволяет сделать вывод о том, что для разработки метода определения структуры стратифицированного слоя, принцип действия которого основан на явлении отклонения светового луча в оптически неоднородной среде, необходимо было решить несколько сложных научно-технических задач: разработать экспериментальную установку, в которой создается горизонтальный или наклоненный под некоторым углом стратифицированный слой углеводородного газа в смеси с воздухом и определить оптимальные режимы измерений.

В научной работе [2] рассмотрены приборы и методы определения концентрации нефти и газа. В работе [3] авторами показана возможность контроля нефтяных загрязнений земной поверхности на безопасной для зрения длине волны лазерного излучения 0,355 мкм. В работах [4, 5] рассмотрена дистанционная оперативная система обнаружения утечек нефти с помощью лазерного флуоресцентного метода. В работе [6] рассмотрены существующие методы ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов и описаны преимущества использования лазерного излучения как альтернативного метода ликвидации последствий от аварии. Авторами работы [7] анализируются методы и приборы индикации паров легких углеводородов в местах их утечек из трубопроводов; подчеркнуты достоинства и недостатки каждого метода, обоснована применимость предложенных методов и показана перспективность их использования. В работах [8, 9] рассмотрены ГОСТы эксплуатации нефтепроводов, правил ликвидации аварий и повреждений на магистральных нефтепроводах.

Основной трудностью измерений в стратифицированном слое является неоднородность и несимметричность распределений плотности и показателя преломления среды. Возможным решением этой задачи является использование известных закономерностей отклонения лазерного луча при прохождении через оптически неоднородность и получение новых данных распределений концентрации при вытекании газа или нефти из открытой трубы (нефтепровода) или трубы, имеющей повреждение на границе с воздухом. Образование слоев, разделяющих горючие газы с воздухом, создает пожароопасные ситуации. Своевремен-

ная диагностика способствует их предотвращению. В общем случае реализация метода сопряжена с преодолением трудностей, связанных с геометрией исследуемой области. Однако в некоторых простых случаях одномерного или двумерного распределений эта задача решается и позволяет получить новые научные данные.

Для разработки метода определения оптимальных режимов измерения и структуры стратифицированного слоя, принцип действия которого основан на явлении отклонения светового луча в оптической неоднородной среде, была создана экспериментальная установка, в которой образуется горизонтальный или наклонный под некоторым углом стратифицированный слой углеводородного газа в смеси с воздухом (рис. 1).

Проведены следующие эксперименты: измерены временные зависимости угловых отклонений луча при его постоянной вертикальной координате; получены зависимости угла отклонения от градиента показателя преломления (концентрации) при различных углах наклона стратифицированного (частично смешанного) слоя; проведены расчеты распределений концентраций в стратифицированном слое.

Объектом исследования в экспериментальных работах является метод расчета распределений концентраций в стратифицированном слое углеводородного газа в воздухе.

В экспериментальной установке, моделирующей стратифицированный слой, угловое отклонение $\varepsilon_y(x, y)$ является функцией двух координат:

$$\varepsilon_y(x, y) = \frac{1}{n_0} \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_{y_k} dx. \quad (1)$$

Здесь $\left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_{y_k} = f(y)$ – градиент показателя преломления света в стратифицированном

слое; n_0 – показатель преломления среды, окружающей оптическую неоднородность (воздух); y_k – вертикальная координата точки вхождения луча в неоднородность; x_1 и x_2 – координаты границ неоднородности (стратифицированного слоя). На рис. 1 представлена схема, поясняющая смысл формулы (1).

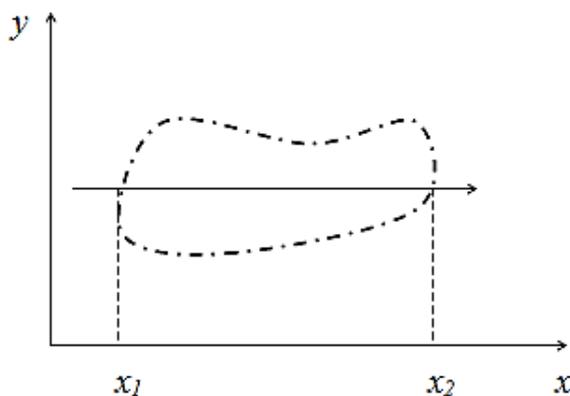


Рис. 1. Схема прохождения луча света в оптической неоднородности

В случае, если $\left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_{y_k} = \text{const}$, а направление распространения луча и градиент показателя преломления перпендикулярны, то выражение (1) примет вид:

$$\varepsilon_y(x, y) = \frac{1}{n_0} \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_{y_k} \cdot (x_2 - x_1). \quad (2)$$

Примером является сканирование лучом лазера горизонтального слоя разделенных тяжелого и легкого газов. В этом случае геометрический путь луча ($x_2 - x_1$) равен длине резервуара, в котором моделируется стратифицированный слой. Если стратифицированный слой динамический, то он может располагаться под некоторым углом φ относительно горизонта. Градиент концентрации разделенных газов в стратифицированном слое также может оказаться постоянным. Однако его величина изменится, что приведет к уменьшению углового отклонения сканирующего луча:

$$\varepsilon_y(x, y) = \frac{1}{n_0} \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_{y_k} (\sin \varphi_{y_k}) dx. \quad (3)$$

В одном частном случае форма стратифицированного слоя может оказаться наиболее удобной для расчета в нем распределения показателя преломления и концентрации газов, например, при вытекании тяжелого газа, форма слоя которого аналогична прозрачной конической фигуре (в плоскости треугольник) (рис. 2).

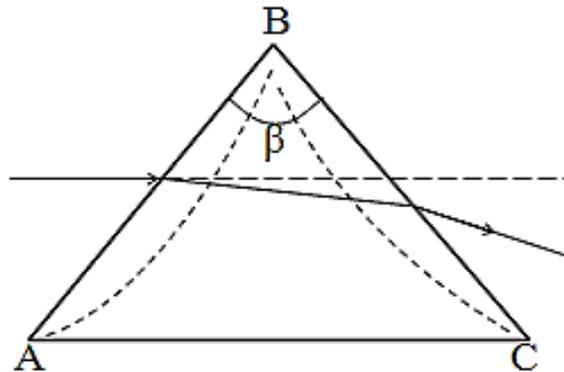


Рис. 2. Схема прохождения луча через наклонный стратифицированный слой

На рис. 2 границы стратифицированного слоя представлены линиями АВ и ВС. Угловое отклонение луча без учета градиентов показателя преломления в самом слое будет в этом случае описываться соотношением:

$$\varepsilon_y = \beta(n - 1), \quad (4)$$

где n – показатель преломления тяжелого газа.

С учетом изменения показателя преломления получим:

$$\varepsilon_y = \beta(n - 1) + 2\delta \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_{y_k} (\sin \varphi_{y_k}), \quad (5)$$

где δ – толщина стратифицированного слоя.

Эксперименты проводили в два этапа. Первый заключался в определении необходимых параметров установки для проведения точных измерений угловых отклонений лазерного луча. Второй – в непосредственном измерении угловых отклонений лазерного луча при различных условиях динамической стратификации углеводородного газа нефти. Далее были проанализированы возможные преимущества и недостатки методов расчета и источники погрешностей методики эксперимента и проводимых измерений. На рис. 3 представлена схема экспериментальной установки для измерения угловых отклонений лазерного луча над открытым резервуаром с нефтепродуктом.

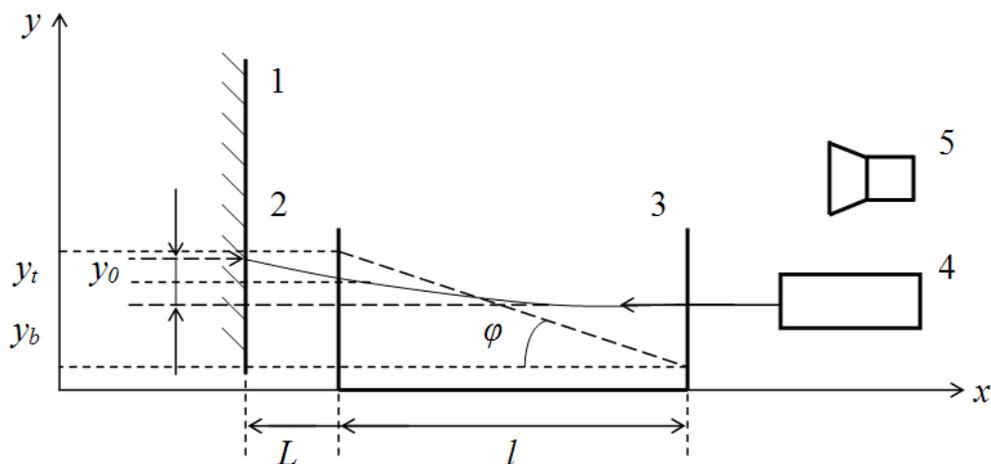


Рис. 3 Схема экспериментальной установки:

1 – измерительный экран; 2 – луч лазера;
3 – открытый резервуар с нефтью; 4 – лазер; 5 – фотокамера

Наклонная штриховая прямая линия на рис. 3 изображает границу стратифицированного слоя. Снизу от нее располагается газ, а сверху – воздух, y_t и y_b – координаты верхней и нижней границы стратифицированного слоя. Производили измерения смещения луча лазера y_0 на экране. Открытый резервуар с нефтью (рис. 3.3) и оптический лазер (рис. 3.4) марки LCS-DTL-317-50 (мощностью 50 мВт), работающий в непрерывном режиме, устанавливали так, чтобы луч лазера оставался параллельным нижней стенке резервуара.

Отклонение луча лазера в сторону слоя газа измеряли миллиметровой линейкой с ценой деления шкалы, равной 0,5 мм. Для уменьшения погрешности измерения отклонения луча расстояние между выходной частью измерительной ячейки и экраном увеличивали до 3 м. Уменьшение диаметра и размытости луча на экране достигалось путем уменьшения выходной энергии лазера. Фотографирование процесса отклонения лазерного луча производили цифровым фотоаппаратом, используя методы визуализации и измерений, описанные в работе [1]. На рис. 4 показаны фотографии отклонения вертикального лазерного луча, проходящего над открытым резервуаром с нефтью.

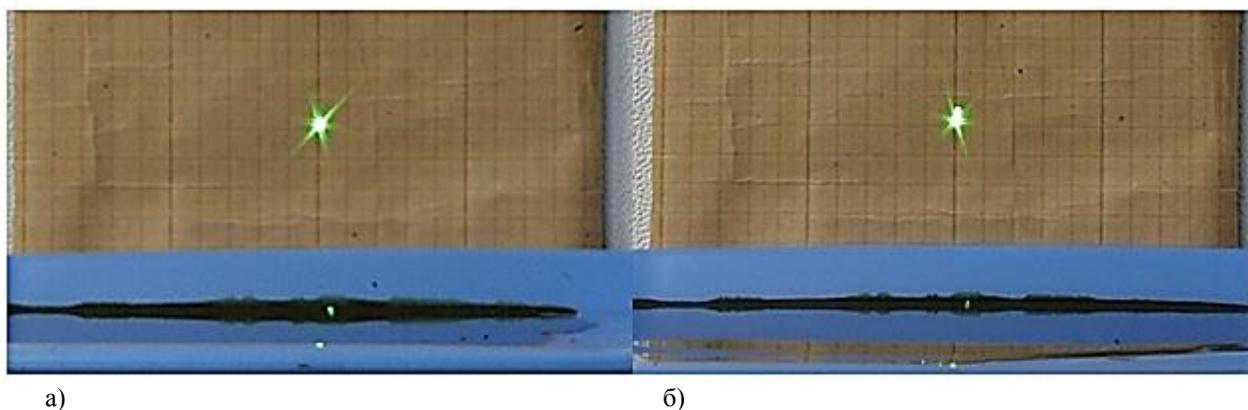


Рис. 4. Фотографии отклонения вертикального лазерного луча, проходящего над открытым резервуаром с нефтью: а – лазерный луч над резервуаром с нефтью; б – вертикальное отклонение луча лазера над открытым резервуаром с нефтью

Угловые отклонения луча лазера изменялись в течение нескольких секунд на значительную величину, поэтому отклонение луча на экране снимали в режиме цифровой видеозаписи. Полученные зависимости позволяют вычислить угловой коэффициент в уравнении,

описывающем поверхность стратифицированного слоя. Тангенс угла наклона стратифицированного слоя равен:

$$\operatorname{tg} \varphi = \left(\frac{y_1 y_2}{\Delta t_1} \right) \frac{\Delta t_2}{l}, \quad (6)$$

где Δt_1 – время разлива нефти в резервуаре;

$\Delta t_2 = t_2 - t_1$ – время процесса стратификации (диффузии).

На рис. 5 показан график, характеризующий отклонение лазерного луча от времени по вертикальной координате.

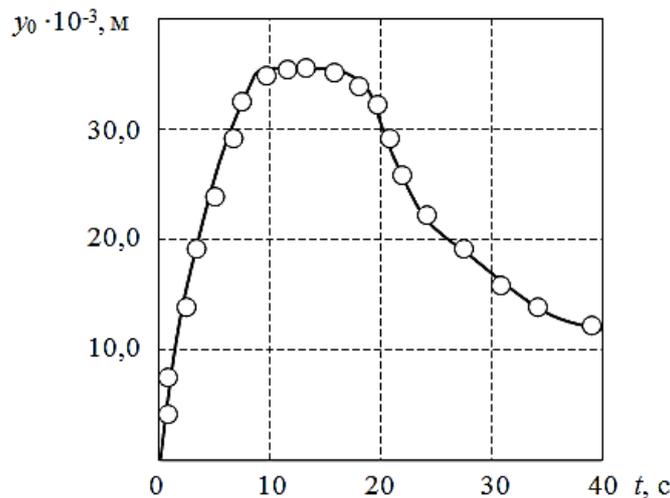


Рис. 5. График зависимости вертикального отклонения луча лазера от времени при фиксированной вертикальной координате лазерного луча

Измерение распределений концентрации газа в стратифицированном слое. Связь показателя преломления с плотностью среды выражается известным соотношением Гладстона – Дэйла (7): $\frac{n-1}{\rho} = \frac{3}{2} K$, (7)

где K – постоянная Гладстона – Дэйла. Для того чтобы получить связь показателя преломления с концентрацией вещества, воспользуемся определением плотности среды как величины $\rho = \frac{m}{V}$, где $m = Nm_0$ – масса вещества; m_0 – масса одной молекулы; N – число всех молекул, находящихся в объеме V . Считая, что в канале координата x_2 находится у края, получим уравнение $x_2 - x_1 = l$. (8)

Угловое отклонение лазерного луча равно: $\varepsilon_y = \frac{1}{n_0} \frac{\Delta n}{\Delta y} l \sin \varphi_{y_k}$. (9)

Из рис. 2, 3 видно, что $\varepsilon_y \cong \operatorname{tg} \varepsilon_y = \frac{y_0}{L}$, (10)

и, следовательно, $\sin \varphi_{y_k} = \operatorname{tg} \varphi_{y_k} = \frac{y_t - y_b}{l}$. (11)

Из соотношения (9) следует, что $\frac{\Delta n}{\Delta y} = \frac{\varepsilon_y n_0}{l \sin \varphi_{y_k}}$. (12)

Вычисления градиента показателя преломления, проделанные по формуле (12), полученной с учетом соотношений (10) и (11) при различных вертикальных координатах луча ла-

зера, представлены на рис. 6. Из графиков зависимости $\frac{\Delta n}{\Delta y} = f(y)$ видно, что в пределах погрешности измерений она является линейной функцией с небольшим угловым коэффициентом. В дальнейшем эту зависимость использовали для вычисления распределения показателя преломления в стратифицированном слое. Очевидно, что при фиксированной координате луча лазера:

$$\Delta n = n - n_0 = f(y_k) \cdot y, \text{ или } n(y) = n_0 + f(y_k) \cdot y. \quad (13)$$

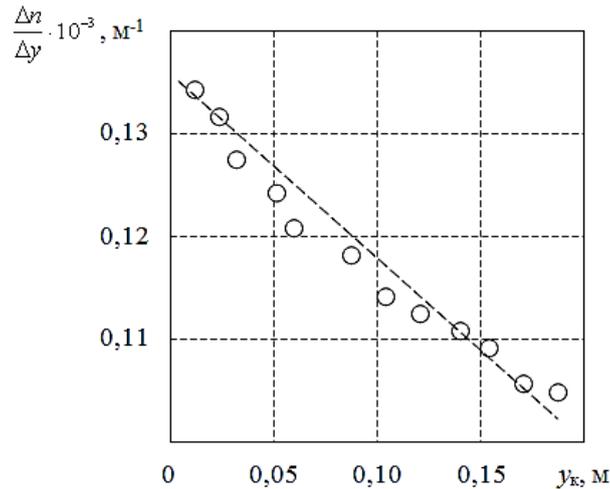


Рис. 6. Зависимость градиента показателя преломления от вертикальной координаты луча лазера

Данные эксперимента, устанавливающие зависимость отклонения луча лазера от времени вытекания газа, позволяют получить дополнительные сведения о структуре стратифицированного слоя.

Погрешность измерения углового отклонения луча во всех проведенных опытах оставалась постоянной и равной:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta l}{l} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{35,5 \cdot 10^{-3}} + \frac{5 \cdot 10^{-3}}{3,53} + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{0,87} \cong \cong 0,01 + 1,4 \cdot 10^{-3} + 0,87 \cdot 10^{-3} = 0,02 = 2 \%. \quad (14)$$

Небольшая погрешность измерений (14) позволяет сделать выводы о физических механизмах, управляющих структурой стратифицированного слоя. Они определяются скоростью процессов молекулярной и конвективной взаимной диффузии газа и воздуха. Величина относительного вклада каждого из видов переноса вещества изменяется по мере испарения газа.

При соблюдении указанных условий метод применим для определения поля концентраций в объеме, в котором происходит утечка или приток газа. В производственных и технологических целях метод может быть использован для оперативного обнаружения изменения концентрации газа в замкнутом объеме. Наибольшая эффективность метода достигается при сканировании следующих объектов: туннелей, шахт и закрытых путепроводов, имеющих большую длину.

Основные трудности реализации метода сканирующего лазерного излучения таковы: необходимость соблюдения геометрической симметрии прозрачной неоднородности; направление луча лазера и расположение исследуемого объекта должны быть ориентированы; чувствительность метода зависит от размеров исследуемого объекта; должна быть обес-

печена доступность исследуемого объема или должно быть известно поле скоростей газа. Одним из способов повышения чувствительности метода является использование многократного отражения луча от противоположных сторон исследуемого объекта.

В работе проведены следующие эксперименты: измерены временные зависимости угловых отклонений луча при его постоянной вертикальной координате; получены зависимости угла отклонения от градиента показателя преломления (концентрации) при различных углах наклона стратифицированного (частично смешанного) слоя; проведены расчеты распределений концентраций в стратифицированном слое. Показано, что диапазон измерений ограничивается длиной сканируемой области и расстоянием от точки выхода луча до экрана. Показано, что чувствительность метода может быть многократно увеличена при многократном отражении луча от противоположных границ сканируемого пространства. Были проанализированы возможные преимущества и недостатки методов расчета, а также возможные источники погрешностей методики эксперимента и проводимых измерений. Полученные новые данные о структуре течения в стратифицированном слое позволят выработать новые меры диагностики утечек нефти и газа при эксплуатации нефте- и газопроводов и повышения пожарной безопасности.

Работа выполнена в рамках проекта в области фундаментальных и прикладных исследований «Комплект приборов для экологического мониторинга и нефтегазового комплекса» при поддержке Департамента образования и молодежной политики (приказ от 25.08.2017 № 1281) Ханты-Мансийского автономного округа – Югры и Сургутского государственного университета.

Литература

1. Alekseev M. M., Smirnova I. V., Semenov O. Y., Samsonov V. P. Modeling Edge Flame Propagation In A Stratified Fuel Gas-Air Mixture // *Technical Physics Letters*. 2012. Vol. 38, № 11. P. 1010–1012.
2. Ганиев М. И., Дёмко А. И., Семенов О. Ю. Применение пьезоэлектрических преобразователей в магнитострикционных уровнемерах // Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов : сб. ст. I Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, состоявшейся в рамках мероприятий I Междунар. молодеж. науч.-практ. форума «Нефтяная столица». Сургут, 8–9 февраля 2018 г. Сургут: УНИИ СурГУ. 2018. С. 59–63.
3. Белов М. Л., Городничев В. А., Матросова О. А., Федотов Ю. В. Лазерный метод обнаружения утечек из нефтепроводов // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, Сер. Приборостроение*. 2013. № 3. С. 108–119.
4. Belov M. L., Belov A. M., Gorodnichev V. A., Kozintsev V. I. Laser method of control for thin oil films on water surface based on measurement of first-order and second-order derivatives of reflection coefficient // *Atmos. Oceanic Opt.*, 2011. Vol. 24, № 7. P. 568–571.
5. Hodgkinson J., van Well B., Padgett M., Pride R. D. Modelling and interpretation of gas detection using remote laser pointers // *Spectrochimica Acta Part A*. 2006. № 63. P. 929–939.
6. Токмаков Е. А., Галанина И. А. Лазерное излучение как альтернативный метод ликвидации аварийного разлива нефти и нефтепродуктов // *Ученые заметки ТОГУ*. 2014. Т. 5. № 4. С. 1045–1050. URL: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2014/TGU_5_318.pdf (дата обращения: 24.10.2018).
7. Первухин П. А. Методы и приборы обнаружения утечек нефтепродуктов / Академия гражданской защиты МЧС России // Технологии техносферной безопасности. 2009, декабрь. Вып. 6. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2009-6/03-06-09.ttb.pdf> (дата обращения: 24.10.2018).
8. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Введ. 1994–10–24 : ГОСТ Р 22.0.05-94. М. : Госстандарт России, 1994. 16 с.

9. Правила ликвидации аварий и повреждений на магистральных нефтепроводах: РД153-39.4-114-01: утв. ОАО АК «Транснефть» 28.12.01: введ. в действие с 20.02.02. URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4294814/4294814849.pdf> (дата обращения: 24.10.2018).