

ция преобладает над вынужденной, а при большей скорости ветра необходимо учитывать вынужденную конвекцию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Моделирование нагрева сухой стенки горящего резервуара с нефтепродуктом. // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: УГЗУ, 2006. – Вып. 20. – С. 3–7.
2. Churchill V.T. Bernstein M. A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow // J. Heat Transfer, 1977. – V. 99. – P. 300 – 306.
3. Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М. Теплотехника. – М.: Высшая школа, 2002. – 671 с.

## УДК 614.8

*Белов В.В., ст. преп., УГЗУ,  
Быков В.М., науч. сотр., ИРЭ НАНУ,  
Комяк В.А., канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., ИРЭ НАНУ,  
Комяк В.В., студент, УГЗУ*

### **О ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК ГАЗА НА ПОДВОДНЫХ УЧАСТКАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ** (представлена д-ром физ.-мат. наук Созником А.П.)

Рассматриваются возможности радиотепловых методов дистанционного зондирования по обнаружению утечек газа из подводных участков трубопроводов в зимний период времени за счет изменений электрофизических характеристик льда при наличии газовых вкраплений в ледяном покрове

**Постановка проблемы.** Наша страна обладает разветвленной сетью магистральных газопроводов как внутреннего, так и экспортного назначения, причем из-за наличия большого количества рек на этих газопроводах имеется значительное количество подводных участков. Диагностика состояния этих участков представляет достаточно сложную задачу и при отсутствии ледяного по-

крова, а с наступлением периода ледостава эти сложности многократно возрастают. При этом ледяной покров существенно повышает опасность таких утечек за счет возможности накопления газа подо льдом в значительном количестве и спонтанного его выброса в атмосферу при повреждении покрова (лунки рыбаков, проход судов и т.д.), что может привести к взрыву. В то же время сам ледяной покров при наличии в воде газовых пузырьков за счет утечки может служить индикатором ее возникновения. Лед является ловушкой для газов и под их воздействием изменяет свою структуру, механические и электрические характеристики. Эти изменения влияют на интенсивность собственного теплового излучения, что может быть измерено радиометрическими приемниками, установленными, например, на санях, автомобиле или на борту летательного аппарата.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Использование свойств льда захватывать газовые пузырьки для исследования водоемов началось сравнительно давно [1]. Пробы льда, взятые на пресных водоемах анализировались с помощью газоанализаторов, спектрометров, оптическими и электрофизическими методами [2]. Исследования показали, что наличие растворенного в воде газа существенно изменяет характеристики льда, который из нее образуется, и изучение его структуры позволяет многое узнать об изучаемом водоеме. Причем важно, что малоподвижный ледяной покров за длительный период своего существования аккумулирует структурные дефекты определенного вида. Накопление структурных дефектов приводит к изменению электрофизических свойств льда, что проявляется в интенсивности собственного теплового излучения покрова и спектральных характеристик в радио- и ИК диапазонах волн. За счет эффектов накопления методы дистанционного зондирования (ДЗ) покрова оказываются более чувствительными, чем методы прямого исследования, например, газового состава атмосферы в данном районе.

Исследования теплового излучения ледяного покрова, характеристикой интенсивности (мощности) которого принято считать яркостную температуру  $T_{я}$ , позволяют определять многие практически полезные параметры путем решения обратных задач ДЗ. Получая информацию об интенсивности излучения и ее пространственном и спектральном распределении, на основе создания адекватных моделей формирования излучения можно, решая обратную задачу, определить некоторые параметры льда. Наибольший

опыт накоплен в решении задачи определения толщины (возраста) морских льдов (например, [3, 4]) и состояния ледниковых покровов [5]. Пресноводным ледяным покровам, в том числе на реках, посвящено значительно меньше работ [1]. При этом в [2] отмечается, что при существенной толщине (когда можно не учитывать интерференцию излучения в слое льда,  $\Delta > \lambda$ ,  $\Delta$  - толщина,  $\lambda$  - длина радиоволны) интенсивность радиоизлучения монотонно возрастает с толщиной пресного льда во всем радиодиапазоне. Наличие в слое льда неоднородностей (пузырьков газа) изменяет интенсивность излучения, что позволяет обнаруживать эти зоны по измерениям  $T_{я}$ , а пространственные распределения  $T_{я}$  привязывать к координатам местности. В литературе (например, [1]) также отмечается, что скорость «захвата» газа ледяным покровом, объемная концентрация и размеры пузырьков существенно зависят от скорости нарастания льда, которая, согласно [2], определяется как

$$V_{\Delta} = \frac{\left[ \sum_n (-T) \right]^{0,695}}{n}, \quad (1)$$

где  $n$  – к-во дней с начала ледостава;  $T$  ( $^{\circ}C$ ) – температура воздуха в каждый из дней.

Зная толщину ледяного покрова на день измерений можно по измеренным значениям  $T_{я}$  выделить зоны ее аномального уменьшения и таким образом (с учетом «сноса» пузырьков на течении) определить предполагаемое место утечки, а с учетом объемной концентрации рассеивателей определить степень опасности.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью данной работы является оценка возможностей методов зондирования для решения этой задачи.

Для успешного решения этой задачи необходимо построить или модифицировать математические модели формирования теплового излучения для рассматриваемого случая. Водную поверхность, покрытую льдом, принято представлять [4] как плоскостую среду (воздух – снег – лед - вода). Для пресных водоемов это тем более справедливо, так как лед имеет большую однородность по толщине и параметрам за счет отсутствия существенного волнения. Для такой среды излучение, измеряемое приемником в ат-

мосфере, будет представлять сумму теплового излучения воды, прошедшего сквозь лед и ослабленного в нем, и добавленного собственного излучения льда (наличие снежного покрова опускаем). Интенсивность излучения водной поверхности существенно зависит от величины отражения на границе вода – лед; отражение от границы перехода лед – воздух существенно ниже из-за близости электрических характеристик воды и льда.

Локальные изменения интенсивности излучения такой среды в рассматриваемом случае могут быть вызваны двумя причинами: появлением во льду большого количества рассеивателей [5, 6] или изменением условий на границе перехода вода – лед.

Рассмотрим оба эти случая с точки зрения модификации «слоистой» модели.

Наличие пузырьков в ледяном покрове. Моделирование среды, состоящей (или содержащей) из большого количества рассеивателей подробно рассмотрено в [6, 7]. В этих работах показано, что учет влияния рассеяния может быть осуществлен с использованием такой характеристики среды, как альbedo рассеяния. Альbedo показывает долю рассеяния в общем ослаблении сигнала в среде

$$\omega = \frac{\sigma_{\text{расс}}}{\sigma_{\text{расс}} + \sigma_{\text{погл}}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{расс}}$  и  $\sigma_{\text{погл}}$  - сечения рассеяния и поглощения, соответственно.

В соответствии с [7]

$$\sigma_{\text{расс}} = \frac{8}{3} \pi k^4 |\alpha|^2, \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{погл}} = 4\pi k \text{Im } \alpha, \quad (4)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - волновое число;  $\lambda$  - длина радиоволны;  $\alpha$  - поляризуемость, определяемая диэлектрическими свойствами рассеивателя  $\varepsilon^* = \varepsilon_r + i\varepsilon_i$ , среды и его размерами.

Основное отличие рассматриваемого нами случая от [7] в рамках этой модели состоит в том, что пузырьки газа в ледяном по-

крове не представляють «плотної упаковки», т.е. в модельному приближенні більше походять на гідрометеори в атмосфері (характеризуються об'ємною концентрацією  $N$ ). Для такої середовища альбедо

$$\omega = \frac{N\sigma_{\text{расс}}}{N\sigma_{\text{расс}} + \gamma}, \quad (5)$$

где  $\gamma$  - погонний коефіцієнт поглинання середовища (льда).

Проведенні нами розрахунки показують, що в рамках цієї моделі урахування розсіювання може дати зменшення  $T_y$  системи льодовода до 20%. Цей результат суттєво залежить від співвідношення розмірів бульбашки газу і довжини хвилі випромінювання.

*Наличие газовой прослойки между льдом и водой.* В випадку малої швидкості наростання льда (1) або при високій інтенсивності утечки газу весь його об'єм не може бути захоплений льдом і між льдовим покривом і водою утворюється шар газу, який може бути однорідною прослойкою або шаром слипшихся бульбашок. Обидва ці випадки призводять до того, що порушуються умови переходу (коефіцієнти відбиття) на межі лід – вода. В багаторівневій моделі [4, 6] це еквівалентно введенню між шарами льда і води додаткового шару повітря (газу). Цей шар з малою діелектричною постійною порушить «згодуюче» дію льдяного покриву, значення діелектричної проникності якого знаходяться між льдом і повітрям. Коефіцієнти Френеля на межі збільшаться і частка випромінювання води в загальному випромінюванні середовища упаде. Це призведе до зменшення яскравості температури, що можуть зафіксувати прилади.

Неоднозначність, пов'язану з впливом бульбашок газу в лід і газовою прослойкою (що значно небезпечніше за рахунок можливості швидкого звільнення значного об'єму газу), може бути легко знята паралельним використанням ІК каналу за рахунок вимірювання температури льда. Появлення прослойки порушить теплообмін між льдом і водою, що викличе локальне змінення кінетичної температури льда.

**Выводы.** Приведенні в роботі модифіковані моделі формування власного теплового випромінювання в радіодіапазоні достатньо адекватні розглядаваній ситуації і можуть служити основою для забезпечення рішення оберненої задачі дис-

танционного зондирования – обнаружения утечек газа на подводных переходах газопроводов в зимний период времени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бордонский Г.С. Тепловое излучение ледяного покрова пресных водоемов. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд, 1990. – 104 с.
2. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1980. - 384 с.
3. Исследование ледяных покровов радиофизическими средствами с аэрокосмических носителей. / В.Б. Ефимов, А.И. Калмыков, В.А. Комяк и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосф. и океана. -1985. т.21, №5. -С.512 - 520.
4. Комяк В.А., Пичугин А.П. Влияние гидрометеорологических условий на излучательные характеристики льдов. // Доклады РАН. сер. Геофизика. – 2002. - т.386, № 6. – С. 818 – 821.
5. Гурвич А.С., Калинин В.И., Матвеев Д.Т. Влияние внутренней структуры ледников на их тепловое радиоизлучение // Изв. АН СССР. Физика атмосф. и океана. – 1973. – т. 9, № 12. – С. 1247 – 1257.
6. Абрамов Ю.А., Комяк В.А., Комяк В.М., Рева Г.В., Росоха В.Е. Обнаружение очагов лесных пожаров и прогноз динамики их распространения. - Харьков: АГЗУ, 2004. – 146с.
7. Иванов Н.И., Комяк В.А., Толубенко В.Г., Долгодуш М.Н. Математическая модель излучения пластовых очагов самонагрева в зерновых насыпях // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: АГЗУ. – 2006. – Вып. 19. – С. 55 – 61.