

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ



УДК 551.345.1+519.2

Ключевые слова: вероятность, трубопровод, полигональная решетка, полигонально-жильные льды, случайная прямая, термокарст.



Ю.В. Станиловская
научный сотрудник
лаборатории геокриологии
Института геоэкологии
им. Е.М. Сергеева РАН,
г. Москва
Stanilovskaya@geoenv.ru



В.П. Мерзляков
к.т.н., ведущий научный сотрудник
лаборатории геокриологии
Института геоэкологии
им. Е.М. Сергеева РАН,
г. Москва
Cryo2@yandex.ru

В статье выполнена оценка опасности развития термокарста с использованием расчета вероятностей пересечения трубопровода с полигонально-жильными льдами – опасным криогенным явлением. Выявлены случаи пересечений трубопровода с полигональной решеткой, при которых площади возможного протаивания подземных льдов являются максимальными, минимальными и среднестатистическими. Рассчитано количество очагов опасности, их размеры и характеристики для подземных трубопроводов на участках распространения полигонально-жильных льдов. Полученные результаты применимы на этапах технико-экономического обоснования строительства трубопроводов, планирования их маршрута и оценки последующих проблем при эксплуатации.

В районах распространения полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) находятся и проектируются трубопроводы, при эксплуатации которых активизируется

термокарст по подземным льдам, образуются понижения, заполненные водой, или сухие провалы.

В данной работе для изучения в качестве источников пора-

жения объекта выбрано одно из наиболее опасных криогенных явлений – ПЖЛ. Они являются высокольдистыми образованиями и хорошо диагностируются по характерному полигональному микрорельефу. Формируются ПЖЛ при морозобойном растрескивании, имеют клинообразную форму и располагаются по сетке, образуя в плане полигональную решетку. Полигоны принимают разнообразную геометрическую форму: от правильных квадратов до шестиугольников. Полигональный рельеф достаточно часто является признаком ПЖЛ, за исключени-

ем участков, где льды находятся в стадии длительной консервации и не проявляются на космоснимках. Эти признаки облегчают исследование, позволяют дать не только качественную, но и количественную оценку опасности возможного протаивания этого льда вдоль трубопровода.

Авторы считают опасным любое положение трубопровода на территории с ПЖЛ. Степень опасности зависит от типа трубопровода. Известно, что при полигональном рельефе наиболее опасна верхняя двухметровая толща, в которой происходит нарушение теплового и влажностного режима грунтов при строительстве и эксплуатации трубопроводов. В то же время полигональная решетка может служить признаком залегания более древних льдов на глубине более 1 м, что может быть обнаружено при строительстве и эксплуатации подземных трубопроводов.

Риск попасть в ПЖЛ может быть высоким при ТЭО, далее риск уменьшается при строительстве и экскавации льдов, однако опасность остается при возможном протаивании реликтовых погребенных льдов на стадии эксплуатации объекта. Последствия развивающегося термокарста по ПЖЛ, образования просадок и обводненных участков на трассе трубопровода выявляются и ликвидируются в ходе мониторинговых работ. Весьма опасными и труднодиагностируемыми, не проявляющимися на космоснимках, являются ПЖЛ, залегающие на глубине 0,8–2,0 м и глубже, находящиеся в стадии консервации (рис. 1). Протаивание таких реликтовых льдов начинается при создании траншеи для трубопроводов и их эксплуатации.

Цель настоящей работы – оценка степени опасности возникновения термокарста и вероятности его развития при прохождении трубопровода по территории распространения ПЖЛ.

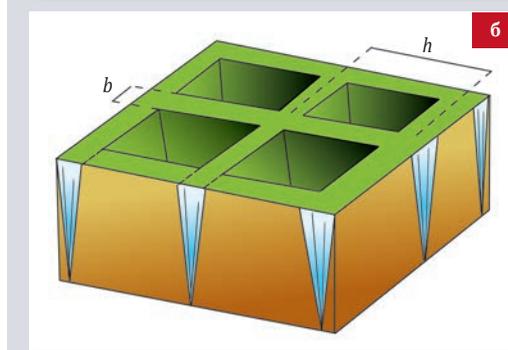
Число нарушений территории на трассе и их площадь характеризуются числом пересечений оси трубопровода с решеткой ПЖЛ, которое зависит от характерных размеров решетки и углов прохождения трубопровода по отношению к ее направлению. Поэтому необходимы рас-



Рис. 1
Надземный трубопровод в Якутии, проложенный по территории с реликтовыми мощными повторно-жильными льдами (фото А.Н. Федорова, Институт мерзлотоведения)



Рис. 2
Полигональная решетка по повторно-жильным льдам в виде правильного квадрата:
а – по маршруту нефтепровода Бадами на севере Аляски [10];



б – соответствующий макет ледяного каркаса, где h – характерный размер полигона, или шаг решетки, b – ширина ледяного клина, или ребра решетки

четы, которые, во-первых, можно использовать на стадии выбора варианта проектируемой трассы для обхода опасных участков, предварительных подготовительных работ по ликвидации льдов, изысканий для обоснова-

ния работ на сложных участках (вплоть до предложения надземных способов прокладки трубопроводов, подобно изображенному на рис. 2а).

Во-вторых, необходимы также расчеты, которые использова-

лись бы на стадии эксплуатации при известном положении трубопровода и помогли бы по косвенным признакам (например, зарождение маленьких оврагов поперек трубопровода) восстановить ориентировку и размеры полигональной решетки.

В связи с этим в работе поставлены следующие задачи:

- выявление наиболее опасных ситуаций, которые могут возникнуть при прокладке трассы трубопровода на участках с полигональной решеткой;
- расчет числа пересечений трассы трубопровода с решеткой ПЖЛ (очагов опасности);
- расчет вероятностей числа пересечений трассы трубопровода с решеткой ПЖЛ;
- расчет площади нарушения от возможного термокарста по трассе трубопровода по очагам неблагоприятного события.

Из числа работ, посвященных вероятностному анализу возникновения и развития термокарста при прокладке линейных объектов по территории распространения ПЖЛ лишь немногие близки по тематике к целям и задачам данной работы [1, 2].

Ниже рассматриваются две методики решения указанных задач. Одна из них основана на более точном и эффективном решении обобщенной задачи Бюффона, в которой числа пересечений вертикальных и горизонтальных прямых взаимозависимы. В этой задаче длина случайной прямой не может выходить за пределы участка, содержащего ПЖЛ. В случае, когда случайная прямая является секущей, начинается и заканчивается за пределами ПЖЛ, числа пересечений оказываются независимыми, и появляется возможность применить методику, основанную на решении классической задачи о случайной паре чисел, выбранной на единичном отрезке.

Задача о нахождении вероятности пересечения трубопровода, расположенного в пределах участка с ПЖЛ

Как было предложено в методиках [3, 4], представим условную схему залегания ПЖЛ в виде ортогональной решетки

(рис. 2а, 2б), образованной наложением системы вертикальных прямых на систему горизонтальных прямых с единичным шагом. Такая схематизация позволит вычислить некоторые вероятности.

Учитывая, что реальная трасса трубопровода может быть приближенно представлена в виде ломаной, состоящей из прямолинейных отрезков, можно говорить о вероятности расположения звеньев ломаной относительно решетки.

Известное решение обобщенной задачи Бюффона [5] позволяет получить решение связанной с ней задачи о вероятности пересечения определенного числа вертикальных прямых и определенного числа горизонтальных прямых случайно расположенной прямой длины $L = n + l$, где $n = 1, 2, \dots$ – натуральные числа, $l < 1$. Иначе говоря, задачи о нахождении двумерного распределения вероятности p_{xy} , где x – случайное число пересечаемых вертикальных прямых и y – случайное число пересекаемых горизонтальных прямых (рис. 3). Конкретные значения чисел, которые могут принимать случайные числа x и y , будем обозначать как ξ и η . Во многих случаях необходимо знать сумму пересечений, т.е. случайную величину $z = x + y$, конкретные значения которой будем обозначать как ζ . В этом решении числа x, y, z принимают дискретные значения. Соответственно, ниже мы получаем дискретное распределение вероятностей.

Вычисление вероятностей p_{xy} проводится с помощью так называемых условных вероятностей. Поясним решение на тестовом примере. Примем $L = 3,5$ ($n = 3, l = 0,5$). Пусть пересечение вертикальных линий отсутствует ($\xi = 0$). Вычислим соответствующую вероятность отсутствия пересечения вертикальных линий [5]

$$P_0 = \frac{2}{\pi} \left[\beta_1 - L + \sqrt{L^2 - 1} \right].$$

Затем вычислим $p_{3/0}, p_{4/0}$ – условные вероятности того, что при нулевом пересечении вертикальных линий имеются 3 и 4 пересечения горизонтальных

линий (по очевидным соображениям $p_{0/0} = p_{1/0} = p_{2/0} = p_{1/1} = 0$). Эти вероятности вычисляются по формулам

$$p_{3/0} = \lambda_0 w_{03}; \quad p_{4/0} = \lambda_0 w_{04},$$

где w_{03}, w_{04} – соответствующие «веса» условных вероятностей, вычисляемые по формулам

$$w_{03} = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2} - \beta_1}^{\frac{\pi}{2}} (4 - L \sin \theta) d\theta,$$

$$w_{04} = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2} - \beta_1}^{\frac{\pi}{2}} (L \sin \theta - 3) d\theta,$$

где $\beta_1 = \arcsin\left(\frac{1}{L}\right)$. Нормирующий

множитель λ_0 возникает потому, что сумма условных вероятностей $p_{3/0} + p_{4/0} = 1$, откуда $\lambda_0 = \frac{1}{(w_{03} + w_{04})}$.

Вероятности того, что отрезок не пересекает вертикальных линий, но пересекает 3 и 4 горизонтальных линии, соответственно равны [6]

$$p_{03} = P_0 p_{3/0}; \quad p_{04} = P_0 p_{4/0}.$$

Затем вычисляются P_1, P_2, P_3, P_4 , в соответствии с процедурами, приведенными выше.

В итоге получаем следующее равенство, содержащее $p_{\xi\eta}$; $\xi, \eta = 0, 1, \dots, 4$.

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & p_{03} & p_{04} \\ 0 & 0 & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ 0 & p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{30} & p_{31} & p_{32} & p_{33} & 0 \\ p_{40} & p_{41} & p_{42} & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Характерно, что элементы таблицы, расположенные в левом верхнем и правом нижнем углах, $p_{00} = p_{01} = p_{02} = p_{11} = p_{34} = p_{44} = 0$. Итоговое равенство имеет вид

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0,05 & 0,03 \\ 0 & 0 & 2,05 \cdot 10^{-3} & 0,14 & 0,06 \\ 0 & 2,05 \cdot 10^{-3} & 0,08 & 0,13 & 0,02 \\ 0,05 & 0,14 & 0,13 & 0,06 & 0 \\ 0,03 & 0,06 & 0,02 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Нетрудно проверить, что выполняется необходимое условие для суммы вероятностей

$$\sum_{\xi=0}^4 \sum_{\eta=0}^4 p_{\xi\eta} = 1.$$

Равенство (1) определяет функцию распределения двумерной случайной величины (ξ, η) с учетом взаимозависимости ξ и η . Сумма индексов каждой вероятности равна, соответственно, сумме чисел пересечений вертикальных и горизонтальных прямых. Математическое ожидание, вычисленное с помощью равенства (1), $M(z) = 4,5$.

На рис. 4 дано графическое изображение вероятностей.

Вышеизложенный метод становится весьма трудоемким при больших числах n (больших длинах случайного отрезка). В этих случаях оценку вероятностей помогает выполнить следующий принцип: с увеличением длины отрезка (числа n) изменяется масштаб значений случайной величины пропорционально L , двумерная функция распределения вероятностей остается неизменной (принцип масштаба). Тогда пропорционально L изменяются основные характеристики распределения: математическое ожидание $M(z)$ и среднее квадратичное отклонение $\sigma(z)$, а новые их значения можно получить простым пересчетом результатов, полученных при решении тестового примера. Поэтому ниже используется формула $M(z) = \frac{4,5L}{3,5}$. С помощью

распределения вероятностей (1) и указанного принципа оцениваются и другие характеристики: количество пересечений или очагов поражения объекта $\zeta = \xi + \eta$, наименьшее число пересечений ζ_{\min} (по наименьшей сумме индексов вероятностей $p_{\xi\eta}$), наибольшее число пересечений ζ_{\max} (по наибольшей сумме индексов вероятностей $p_{\xi\eta}$, обычно $\zeta_{\max} \approx 2\zeta_{\min}$), среднестатистическая площадь пораженного участка $S = abM(z)$, м²; минимальная площадь пораженного участка $S_{\min} = abc_{\min}$, м²; максимальная площадь пораженного участка $S_{\max} = abc_{\max}$, м². Значения перечисленных величин получаются из результатов вышеуказанного тестового расчета путем умножения на $\frac{L}{3,5}$.

Следует иметь в виду, что безразмерная математическая

Рис. 3
Условная схема залегания ПЖЛ в виде простейшего разбиения плоскости на единичные квадраты

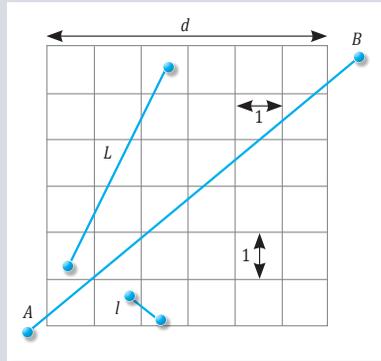


Рис. 4
Вероятности пересечения вертикальных и горизонтальных прямых решетки $p_{\xi\eta}$

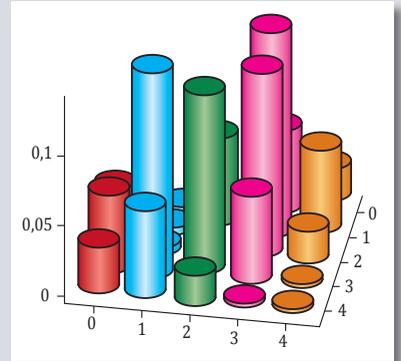
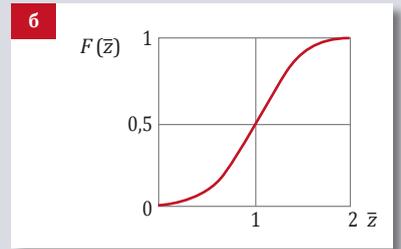
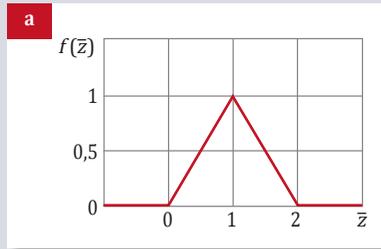


Рис. 5
К расчету вероятности суммы пересечений z линейного объекта с ребрами ледяной решетки: а – плотность вероятности случайной величины \bar{z} ; б – функция распределения \bar{z}



длина отрезка, используемого в вероятностных расчетах, связана с размерной длиной $L = \frac{s}{h}$. Максимальная площадь пораженного участка при наложении нефтепровода на лед решетки $S_{iw} = sb$, м². Последний термин требует разъяснения.

На оценку вероятности влияет то, что линейные объекты – не математические линии: они имеют ширину a (диаметр трубопровода). Линии решетки имеют толщину b (ширина ледяного клина, или ребра решетки).

Величины a и b определяют условную вероятность при $\theta \approx \frac{\pi}{2}$

$$P_{iw} = a/(h - b), \quad (2)$$

где h – характерный размер полигона. Выражение (2) по смыслу есть вероятность наложения трубопровода на ребро ледяной решетки. Оно может иметь самостоятельное значение как критерий опасности или комплексная характеристика, оценивающая опасность данного сочетания

трубопровода с ПЖЛ (чем величина P_{iw} больше, тем данное сочетание опаснее).

Задача о нахождении вероятности пересечения трубопровода, выходящего за пределы участка с ПЖЛ

Линейными объектами большой длины назовем объекты, имеющие длину $s > d\sqrt{2}$, где d – характерный размер области распространения ПЖЛ. Это означает, что L заведомо больше числа параллельных прямых в системе $n+1$. Для расчета характеристик в этом случае требуется другой метод, в котором L и n не связаны.

Представим область распространения ПЖЛ в виде квадрата, сторона которого приведена к единице. Как и прежде, подразумевается, что квадрат рассечен двумя системами параллельных прямых, ориентированными по его сторонам, образующими решетку с характерным размером $\varepsilon \approx \frac{h}{d}$, где d – размер области, h – шаг полигона. Целая часть

Рис. 6

Типы пересечения квадрата случайной прямой:

- 1 – пересечение пары вертикальных сторон квадрата;
- 2 – пересечение пары горизонтальных сторон квадрата

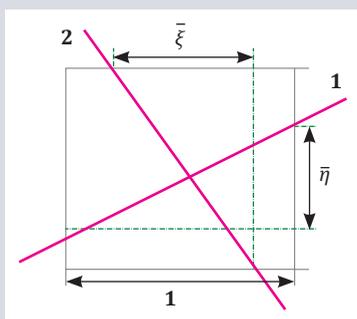
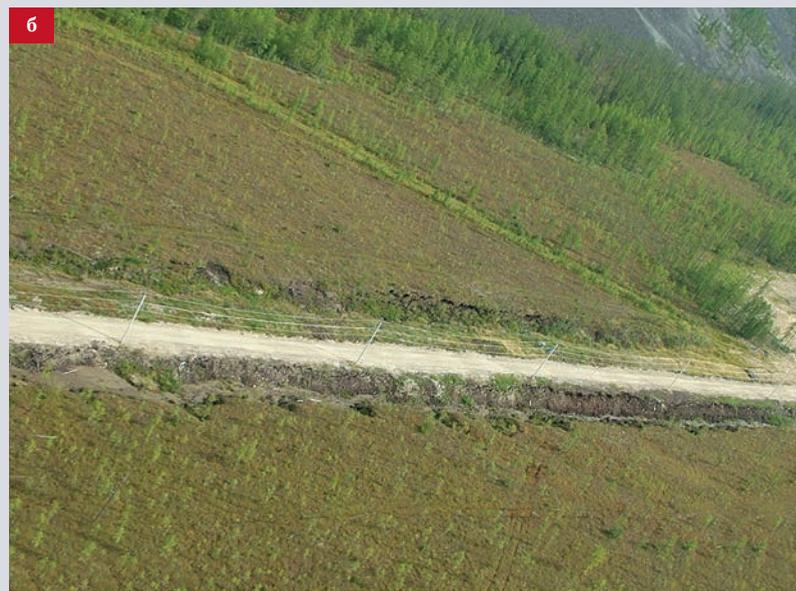


Рис. 7

Опасный участок с термокарстом и оврагообразованием по полигональной решетке с подземными льдами на трассе МН ВСТО-1 в Чульманской котловине по данным: а – космоснимка 03.02.2013 г. (Google Earth); б – аэровизуального обследования в 2011 г.



отношения $\frac{d}{h}$ есть число полос n , которое определяет число вертикальных или горизонтальных линий. Так, если $d=2000$ м, $h=20$ м, то $\varepsilon=0,01$, $n=100$ (Анадырский участок, рассмотрен ниже). Условная вероятность наложения трубопровода на ребро лежачей решетки по-прежнему выражается формулой (2).

Положение прямой, пересекающей квадрат, характеризуется парой независимых случайных чисел \bar{x} и \bar{y} , которые принимают значения $\bar{\xi}$ и $\bar{\eta}$. Для анализа воспользуемся плотностью вероятности и функцией распределения классической задачи о случайной паре чисел $(\bar{\xi}, \bar{\eta})$, выбранной на единичном отрезке. Умножая $\bar{\xi}$ и $\bar{\eta}$ на $n+1$ и выделяя целые части, получим числа пересечений вертикальных и горизонтальных прямых ξ и η . Как и выше, нас будет интересовать сумма пересечений. Умножая $\bar{\zeta}=\bar{\xi}+\bar{\eta}$ на $n+1$ и выделяя целую часть, получим сумму $\zeta=\xi+\eta$ числа пересечений вертикальных и горизонтальных прямых данным отрезком, т.е. значения случайной величины $z=x+y$. Заметим, что величины $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{\xi}, \bar{\eta}, \bar{\zeta}$ изменяются непрерывно, а величины $x, y, z, \xi, \eta, \zeta$ – дискретно. Таким образом, обозначения x, y, z и ξ, η, ζ имеют тот же смысл, что и в предыдущем разделе.

Плотность вероятности и функция распределения случайной величины \bar{z} определяются следующим образом (рис. 5а и 5б) [7]

$$f(\bar{z})=0, \bar{z}<0, f(\bar{z})=\bar{z}, 0\leq\bar{z}\leq 1;$$

$$f(\bar{z})=2-\bar{z}, 1<\bar{z}<2; f(\bar{z})=0, \bar{z}\geq 2;$$

$$F(\bar{z})=0, \bar{z}<0; F(\bar{z})=\frac{\bar{z}^2}{2}, 0\leq\bar{z}\leq 1;$$

$$F(\bar{z})=1-\frac{(2-\bar{z})^2}{2}, 1<\bar{z}<2; F(\bar{z})=1, \bar{z}\geq 2.$$

При пересечении квадрата случайной прямой могут возникнуть, например, следующие два случая (рис. 6).

Другие типы пересечений области, содержащей ПЖЛ, объектами большой длины здесь не будут рассматриваться в связи с ограниченным объемом статьи.

Случай 1 на рис. 6 соответствует значениям переменных

Табл. 1
Вероятностные характеристики опасных участков для трубопроводов

Отрезок трубопровода	Величина стороны квадрата	Параметры трубопровода			Параметры ПЖЛ		Количество пересечений (очагов)				Площадь пораженного участка				Вероятность*
		Длина отрезка трубопровода	Длина трубопровода	Диаметр трубопровода	Характерный размер полигона	Ширина ледяного клина	Математическое ожидание	Наименьшее	Наибольшее	Фактическое	Минимальная	Средняя	Максимальная	Максимальная, при наложении трубопровода на лед решетки	
МН-А-В-10	-	410	41	1,2	10	1	52,7	31	60	37	37,2	63,2	72	410	0,13
МГ-А-В-15	2000	-	-	0,26	15	3	178,2	134	268	-	104,5	139	209	520	0,022
МГ-А-В-20	2000	-	-	0,26	20	3	134,3	101	202	-	78,8	104,7	157,6	520	0,015

*Безусловная вероятность каждого единичного события (например, равенства $\theta \approx \frac{\pi}{2}$) мала вследствие множественности исходов, поэтому в графе «Вероятность» указаны условные вероятности наложения трубопровода на ледяное ребро решетки.

$$\bar{\xi} = 1, 0 \leq \bar{\eta} \leq 1, 1 \leq \bar{\zeta} \leq 2.$$

Случай 2 на рис. 6 соответствует значениям переменных

$$\bar{\eta} = 1, 0 \leq \bar{\xi} \leq 1, 1 \leq \bar{\zeta} \leq 2.$$

Таким образом, нас будет интересовать правая часть графиков на рис. 5. Это необходимо учитывать при вычислении характеристик. Так, при расчете математического ожидания мы получим $M(\bar{z}) = 1,33$ а не $M(\bar{z}) = 1$, как в случае симметрии плотности вероятности. Среднестатистическое значение числа пересечений равно $M(z) = (n+1)M(\bar{z})$.

Из графика плотности вероятности (рис. 5а) следует, что наиболее вероятные значения \bar{z} группируются вблизи $\bar{\zeta} = 1$. Из этого, в свою очередь, следует, что необходимое условие для попадания трубопровода на ребро ледяного каркаса более вероятно при $\bar{\eta} \approx 0$ в **случае 1** (рис. 6) и $\bar{\xi} \approx 0$ в **случае 2**.

Вероятностная оценка опасности повторно-жильных льдов для некоторых трубопроводов

В приложениях предлагаемой теории использовались фактические данные по трем участкам: один – с подземным нефтепроводом в Чульманской впадине; второй и третий – с подземным газопроводом в районе г. Анадырь. Характерные размеры полигональных решеток и размеры линейных объектов, необходимые для выполнения вероятностных оценок, были взяты с космоснимков. Размеры нарушений на трассах

зависят от диаметра трубопровода и характеристик транспортируемого материала.

Решение обобщенной задачи Бюффона использовалось при интерпретации данных на Чульманском участке МН Восточная Сибирь – Тихий Океан-1 (МН ВСТО-1) (рис. 7а, б). При аэровизуальном и наземных обследованиях была зафиксирована термоэрозия вдоль оси МН. Бурением на глубине 1 м вскрыт ледяной горизонт мощностью 4 м, свидетельствующий о потенциальном местоположении ПЖЛ.

Отдельные звенья МН представим прямолинейными отрезками. Например, длина s опасного участка МН-А-В-10 составляет 410 м, диаметр трубопровода a равен 1,2 м (табл. 1). Полигональность на рассматриваемом участке нефтепровода на космоснимках не фиксируется, поскольку льды находятся в стадии консервации [8]. Размеры полигональной решетки h можно восстановить по растущим термоэрозионным оврагам поперек МН, расстояние между которыми составляет 10 м. На других участках протаивание не выражено. Возможно, льды на остальных участках либо отсутствуют, либо глубоко законсервированы, и эксплуатационная деятельность на МН не приводит к активизации термокарста на сегодняшний день.

По образовавшимся оврагам подсчитано фактическое количество опасных очагов (т.е. пересечений решетки ПЖЛ с МН), равное 37, величина которого лежит в диапазоне расчетных значений 31 и

60. Средняя площадь пораженного участка S составляет 63,2 м². Максимальная площадь пораженного участка при наложении нефтепровода на лед решетки S_{iw} (самая опасная ситуация) составляет 410 м² с условной вероятностью $P_{iw} = 0,13$.

Другой пример представлен подземным магистральным газопроводом (МГ) Западно-Озерное – Анадырь, который начинается и заканчивается за пределами территории с выраженной полигональной решеткой. Величина сторон рассматриваемого участка d составляет 2000 м, диаметр трубопровода a равен 0,26 м (табл. 1).

Рассматриваются два участка с разницей в размерах полигональной решетки: в одном случае шаг решетки h равен 15 м, во втором – 20 м, что сказывается на величине условной вероятности P_{iw} попадания трубопровода на ребро решетки, равной 0,022 и 0,015 ($\theta \approx \frac{\pi}{2}$). Среднее количество пересечений решетки ПЖЛ с МГ (математическое ожидание) при шаге решетки ПЖЛ $h = 15$ м – 178,2, а при $h = 20$ м – 134,3. Сравнение двух близкорасположенных участков дает представление об увеличении опасности при уменьшении шага решетки ПЖЛ при прочих равных условиях. Максимальная площадь пораженного участка при наложении газопровода на лед решетки S_{iw} не зависит от шага решетки и составляет 520 м².

Обсуждение результатов

В основе метода изучения, принятого в работе, лежит анализ опас-

ности сочетания трубопровода с ПЖЛ.

Как показывают результаты расчетов по обоим методикам, вероятности некоторых отдельных событий (попадание угла наклона отрезка в узкий сектор, попадание в узкую полосу изменения координаты, пересечение определенного числа линий) невелики, но возможны. Это замечание требует особого внимания.

Известно, что вероятность невозможного события равна нулю. Однако нулевой вероятностью обладают не только невозможные, но и некоторые возможные события. Действительно, событие $\xi = a$, состоящее в том, что непрерывная случайная величина ξ принимает значение a , возможно, но вероятность его равна нулю. Это один из важнейших парадоксов теории вероятностей.

Однако из того, что событие $\xi = a$ имеет вероятность, равную нулю, вовсе не следует, что это событие не будет появляться, т.е. что частота появления этого события равна нулю. Из этого следует только, что при неограниченном повторении опыта это событие будет появляться сколь угодно редко.

В вышерассмотренных случаях события имеют определенную конечную вероятность, а некоторые из них – и немалую (порядка 0,1 и более). Поэтому можно утверждать, что все указанные события могут появляться не так уж редко, чтобы ими пренебрегать. Опыт подтверждает это.

Несмотря на малую вероятность самой опасной ситуации, строители газопровода Западно-Озерное – Анадырь, понесли незапланированные траты при ликвидации последствий внезапного таяния ПЖЛ на участке протяженностью 100 м, которые продолжались в последние годы [9]. Оказалось, что при создании траншеи в нижней части склонов увалов и речных долин были вскрыты погребенные реликтовые ПЖЛ шириной $b = 3$ м и шагом решетки $h = 15 - 20$ м. Сразу же начала образовываться просадка глубиной от 2 до 5 м. В районе проектирования трассы никаких предпосылок их нахождения до начала строительства не было. По результатам обследо-

вания траншеи МГ в 2003 г. было выявлено 13 аварийных участков протяженностью 50–400 м, связанных с термоэрозией и термокарстом по погребенным подземным льдам. Рекультивация нарушений в первые два года пробной эксплуатации привела к значительному удорожанию строительства.

Применяемые в работе методы могут быть частью комплексных исследований, снижающих опасность пересечения трубопровода с ПЖЛ. Ими можно воспользоваться при разработке методики выбора оптимального варианта проектируемой трассы на участках с ПЖЛ, а также для обоснования объема изыскательских и проектных работ (вплоть до предложения надземных способов прокладки трубопроводов).

Следовало бы обратить внимание на один убедительный пример. Тщательное изучение аналогичных условий при сооружении нефтепроводов на севере Аляски, позволило обосновать и осуществ-

твить следующий проект [10]. Надземный нефтепровод Бадами (протяженность 40 км, диаметр 0,3 м) во избежание развития термокарста по ПЖЛ построен в зимнее время без притрассовой дороги, чтобы не нарушать грунтовую сплошность и не спровоцировать протаивание подземных льдов (рис. 2а). Мониторинг на трубопроводах такого типа осуществляется только с вертолета.

Развитие представленной методики, позволяющей определить площадь пораженных участков и вероятность развития термокарста вдоль трассы трубопровода, может быть направлено в сторону оценки экономического риска, при расчете которого необходимо учитывать такой показатель, как уязвимость трубопровода при протаивании ПЖЛ.

*Авторы благодарят
заведующего лабораторией
геокриологии
к.г.-м.н. Д.О. Сергеева
за ценные советы.*

Выводы

1. Впервые предложены способы, позволяющие рассчитывать количество пересечений трубопровода с решеткой ПЖЛ (очагов поражения объекта на трассе) и их вероятностей.
2. Получена комплексная характеристика – критерий опасности P_{iw} (2), с помощью которой можно оценить опасность сочетания данного трубопровода с ПЖЛ. Эта же величина является условной вероятностью наиболее опасной ситуации, которая может возникнуть при прокладке трассы трубопровода на участках с ПЖЛ – попадание трубопровода на ребро ледяного каркаса (табл. 1).
3. Рассмотрены примеры трубопроводов (табл. 1), для которых даны минимальное и максимальное числа пересечений, их математическое ожидание, максимальная, минимальная и среднестатистическая площади возможного поражения объекта, условная вероятность наиболее опасной ситуации.
4. Показано, что в случае объекта большой длины, выходящего за пределы участка, содержащего ПЖЛ, для рассмотренных типов пересечения 1 и 2 (рис. 6) наложение трубопровода на ребро ледяного каркаса более вероятно при $\bar{\eta} \approx 0$ или $\bar{\xi} \approx 0$. Для этих же типов пересечений характерно увеличение среднестатистической площади пораженного участка (табл. 1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McIntyre G. A. Estimation of plant density using line transects // Journal of Ecology. 1953. № 41. Pp. 320–330.
2. Хомяков П. М. Влияние глобального потепления на газовую отрасль [Электронный ресурс]. URL: <http://www.velesova-sloboda.org/misc/homyakov-gasprom.html>. 2006.
3. Гасанов Ш. Ш. Объемная льдистость мерзлых пород. Перигляциальные процессы // Труды СВКНИИ ДВО РАН. 1971. Вып. 38. С. 167–180.
4. Васильчук Ю. К. Новый подход к расчету макротекстурообразующей льдистости за счет повторно-жильных льдов // Инженерная геология. 2009. № 4. С. 40–47.
5. Кендалл М., Моран П. Геометрические вероятности. М.: Наука, 1972. 192 с.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
7. Мостеллер Ф. Пятьдесят занимательных вероятностных задач. М.: Наука, 1971. 103 с.
8. Экзогенные геологические процессы и явления (Южная Якутия) / Е. Н. Осипников [и др.]. М.: Изд-во Московского ун-та, 1980.
9. Трегубов О. Д. Опыт опережающего геокриологического районирования трассы магистрального газопровода Западно-Озерное – Анадырь // Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы. Москва, 2013. С. 173–176.
10. Fiscal Year 2007 Lease Compliance Monitoring Report. State Pipeline Coordinator's Office. Alaska Department of Natural Resources. P. 90.

Key words: *hydraulic retesting, operating pressure, supporting capacity, cyclic fatigue crack growth*

DESIGN

48 THE POTENTIAL THERMOKARST HAZARD ASSESSMENT OF THE WEDGE POLYGONAL ICE FOR THE PIPELINES

Stanilovskaya Y.V. (Stanilovskaya@geoenv.ru), Merzlyakov V.P. (Cryo2@yandex.ru), Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow, Russia

The potential thermokarst hazard assessment by using the probability calculation of the pipelines' intercrossing with the dangerous cryogenic phenomenon – the wedge polygonal ice is discussed in this paper. The cases of the intersections between the linear objects and polygonal network were identified, where the areas of potential subsurface ice thawing are maximum, minimum and average. The number of danger outbreaks, their dimensions and characteristics for the pipelines on polygonal territory were calculated. The results are applicable to the stages of a feasibility study of the construction, route planning and for the assessment of future problems during the operation.

Key words: *probability, pipeline, polygons, ice wedges, random line, thermokarst*

MATERIALS & EQUIPMENT

55 ELECTRICAL DRIVES WITH ELECTROMECHANICAL CONTROL UNIT FOR STOP VALVES WITH MAXIMUM ROTATION TORQUE OF 10000 NM

Brezgin A.E. (BrezginAE@tom.transneft.ru), Skvorcov V.V. (SkvortsovVV@tom.transneft.ru), JSC TsentrSibnefteprovod, Tomsk, Russia

The article provides the experimental-design work regarding the development of standard series of explosion-proof multiturn electrical drives with electromechanical control unit for stop valves with maximum rotation torque of 10 000 Nm.

Key words: *explosion-proof electrical drive, electromechanical control unit, contactless position sensor, isolation valves, maximum torque, pressure drop on the valve, experimental-design work, experimental specimen, commissioning tests, technical specifications, series production*

AUTOMATICS, TELEMECHANICS & COMM

60 IMPLEMENTATION OF THE STANDARD IEEE 802.1X FOR AUTHENTICATION AND AUTHORIZATION OF USERS AND WORKSTATIONS ON A CORPORATE NETWORK

Borovikov E.A. (BorovikovEA@nru.brn.transneft.ru), Yakovlev D.A. (YakovlevDA@nru.brn.transneft.ru), Kachanov A.A. (KachanovAA@nru.brn.transneft.ru), Yavorsky R.V. (YavorskyRV@nru.brn.transneft.ru), Bytkov A.A. (ButkovAA@nru.brn.transneft.ru), «Druzhba» oil-trunk pipelines JSC, Veliky Novgorod, Russia

The 802.1x standard is used for authentication and authorization of users and workstations in the data network. Thanks to the standard 802.1x it is possible to provide users with access rights to the corporate network and its services according to the group or the position, which owns a particular user. Thus, by connecting to the wireless network, or to a power outlet anywhere in the corporate network, the user will automatically be placed on the VLAN, which is predetermined by the group policy, to which is attached a user account or a workstation in AD. To this VLAN the access list ACL will be linked (static or dynamic, depending on user rights) in order to control access to corporate services. In addition, access

lists can be assigned to the VLAN QoS policies to control bandwidth.

Key words: *authorization, authentication, accounting*

63 PERSPECTIVES OF IMPLEMENTATION OF PLANNING AND DEVELOPMENT PROGRAMMERS FOR PRODUCTION PROCESS AT THE FACTORIES AND CENTRAL SERVICE BASES OF JSC AK TRANSNEFT

Pushkarev A.P. (PushkarevAP@oms.transneft.ru), Moshninov V.V. (MoshninovVV@oms.transneft.ru), Kostukov K.A. (KostukovKA@omsbpo.oms.transneft.ru), JSC Transsibneft, Omsk, Russia

The article describes the typical problems that are faced by the production sphere staff in its professional experience. The decisions which are implemented by JSC Transsibneft with the aim of production process automatization are provided.

The article covers the automatization of Omsk JSC Transsibneft central service base with usage of "Solution complex "ASCON" and "Production control" of corporate information system "FLAGMAN" on the preparation stage of design and production documentation, production preparation stage, annual and monthly plan.

Key words: *production, automatization, control, design-engineering preparation*

68 GENERALIZING A COMPLEX CRITERION FOR ASSESSING THE PERFORMANCE OF VDI PROTOCOLS TO THE VIRTUAL ENVIRONMENT

Makarov M.A. (MakarovMA@sam.transneft.ru), JSC Privolzhsknefteprovod, Samara, Russia

In order to reduce the cost of maintenance of user applications, increase their scalability, and manageability, companies are increasingly implementing VDI (Virtual Desktop Infrastructure). Measuring the performance of access protocols to VDI is a difficult task, because it requires comprehensive analysis of consumed resources having different dimensions. This article describes a novel method for comparing the performance of the main VDI protocols, showing that the values for all significant resource can be resolved into one dimension – the dimension of «time» and combined as a complex criterion.

Key words: *complex criterion, VDI protocol, VDI, performance, VDItest*

ENERGY SAVING

74 EXTENDING THE FUNCTIONALITY AND INCREASING THE RELIABILITY OF POWER CONTROL SYSTEMS FOR 1ST CATEGORY CONSUMERS

Zamulin V.I. (telec@mail.npptec.ru), Gusevsky V.V. (Vitaly@mail.npptec.ru), SME TEC Ltd., Tomsk, Russia

The article contains description of methods to increase power supply reliability of oil and gas industrial facilities, comparison of variants of backup power supply, improvement of automatic-transfer scheme functionality. It also includes a description of ELTEK multi-function power control device, developed by specialists of SME TEC Ltd., aimed for protection and control of power supply systems of improved reliability at facilities of the 1st category of power supply reliability.

Key words: *electric power quality, three-phase supply, automatic load transfer, ALT, uninterrupted power supply, power management, excess voltage, excess voltage protection*

НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ

ТРУБОПРОВОДНОГО
ТРАНСПОРТА НЕФТИ
И НЕФТЕПРОДУКТОВ

ТРАНСНЕФТЬ.РФ



TRANSNEFT.RU

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

PIPELINE-SCIENCE.RU

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ
ИСПЫТАНИЯ ПРОТИВОТУРБУЛЕННЫХ
ПРИСАДОК

стр. 6

ПЕРЕКАЧКА НЕФТИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ
ПРОТИВОТУРБУЛЕНТОЙ
ПРИСАДКИ

стр. 12

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ
РАБОТЫ НЕФТЕПРОВОДА

стр. 27

ПОВЫШЕНИЕ
НАДЕЖНОСТИ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ

стр. 74

ЭКОЛОГИЧЕСКИ
ОБОСНОВАННЫЕ РЕШЕНИЯ

стр. 92

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ
В КОМПАНИИ
НЕФИНАНСОВОГО СЕКТОРА

стр. 98

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ РАЗВИТИЯ
ТЕРМОКАРСТА

стр. 48

АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

стр. 63



ISSN 2221-2701



9 772221 270005

№ 3

[11] 2013

