

УДК 551.594:621.643

## Грозы в Якутии и их влияние на магистральные трубопроводы

В.И. Козлов, В.А. Муллаяров, А.Е. Васильев, Ю.А. Ромащенко,  
Ю.М. Григорьев, С.Н. Еремеев, В.В. Наумов, В.Е. Степанов, М.Н. Орлова

*Максимальное число очагов гроз на территории Якутии наблюдается в южной и западной частях, где проходят или предполагается прокладка трубопроводов. Проведенные модельные расчеты показали, что максимальное значение силы тока, наводимое грозовым разрядом в трубопроводе, зависит от расположения облаков и от расстояния между облаками и проводником (трубопроводом). Чем ближе расположены облака, тем меньше амплитуда возникающих волн силы тока и напряжения. Косвенные измерения токов, текущих по металлической трубе нефтепровода во время грозы, дают величины ~ 5 – 10 A.*

*The Maximal number of the centers of thunderstorms in territory of Yakutia is observed in southern and western parts where pass or the lining of pipelines is supposed. The lead modeling calculations have shown that the maximal value of force of a current directed by a lightning discharge in the pipeline depends on cloud location and distance between clouds and a conductor (pipeline). The closer clouds, the less amplitude of arising waves of force of a current and a pressure are located. Indirect measurements of the currents on a metal pipe of an oil pipeline during a thunderstorm, give size ~ 5 - 10 A.*

Одна из основных причин аварий на трубопроводах – это электрохимическая коррозия труб. Электрохимическая коррозия, в частности, может быть вызвана индуцированным полем грозовых облаков, которые создают в трубопроводе потенциал, способствующий окислительно-восстановительной реакции металла с окружающей средой. Целью данной работы является исследование токов, возникающих из-за грозовых разрядов в трубопроводах, проложенных в вечной мерзлоте.

### Аппаратура и методика регистрации

Для наблюдения гроз используется пассивный грозопеленгатор- дальномер, разработанный в ИКФИА СО РАН и использующийся для наблюдений гроз с 1993 г. [1-4]. Местоопределение гроз

осуществляется с помощью трех антенн, позволяющих измерять вертикальную электрическую и две горизонтальные магнитные составляющие электромагнитного поля атмосфериков [1]. Направление определяется по отношению среднеквадратичных значений сигналов магнитных антенн. Неоднозначность пеленга устраняется сопоставлением знаков взаимной корреляции электрической и магнитной компонент сигнала атмосферика. Стандартное отклонение погрешности составило 2,5° для всех направлений.

Дальность до грозового разряда определяется как среднегеометрическое измерение дальности по каждому из четырех следующих признаков. Это среднеквадратичные значения: Е - составляющей сигнала атмосферика и Н - составляющей, принятой на две скрещенные рамочные антенны, количества положительных и отрицательных полупериодов Е - составляющей атмосферика, по амплитуде превосходящих уровень, равный 0,1 максимальной величины. Калибровка дальномерной части системы осуществлена разнесенной системой из двух пунктов с базой 540 км. Измеренная ошибка определения координат молниевого разряда однопунктовой дальномерии составила 15 % от дальности. У межоблачных разрядов отношение спектральных амплитуд сигнала на верхних и нижних частотах в ОНЧ – НЧ диапазоне превосходит аналогичное отноше-

КОЗЛОВ Владимир Ильич – к.ф.-м.н., с.н.с.  
ИКФИА СО РАН; МУЛЛАЯРОВ Виктор Арсланович –  
к.ф.-м.н., с.н.с., зав. лаб. ИКФИА СО РАН;  
ВАСИЛЬЕВ Алексей Егорович – м.н.с. ИКФИА СО  
РАН; РОМАЩЕНКО Юрий Александрович – д.ф.-  
м.н., с.н.с. ИКФИА СО РАН; ГРИГОРЬЕВ Юрий  
Михайлович – д.ф.-м.н., проф., зам. директора ФТИ  
ЯГУ; ЕРЕМЕЕВ Степан Николаевич – к.ф.-м.н., проф.  
ФТИ ЯГУ; НАУМОВ Виктор Валентинович – к.-ф.-  
м.н., в.н.с. НИМ ЯГУ; СТЕПАНОВ Валерий Егорович –  
д.ф.-м.н., зав. каф. ФТИ ЯГУ; ОРЛОВА Марфа  
Николаевна – ассистент ФТИ ЯГУ.

ние у главных обратных разрядов на землю. В 1993-1994 гг. анализировался спектр атмосферика и находилась частота, для которой сумма спектральных плотностей левее этой частоты равна сумме спектральных плотностей правее нее [2]. Наземные разряды составляют приблизительно треть всех регистрируемых. На этом основании определялась пороговая частота (в среднем 15 кГц), соответствующая спектральной границе раздела наземных и межоблачных разрядов. Разряды, имеющие частоту больше пороговой, отбраковывались, как межоблачные. С 1996 г. нами рассчитывается коэффициент автокорреляции для сдвига в 8 мкс для сигналов, снимаемых с Е-антенны. Нами было проанализировано распределение этого коэффициента автокорреляции для летних атмосфериков и найдено пороговое значение, соответствующее одной трети наиболее низкочастотных атмосфериков. Атмосферики, имеющие коэффициент автокорреляции, превышающий этот порог, то есть более низкочастотные, рассматриваются, как вызванные молниевыми разрядами облако-земля.

### Характеристики гроз

Количество регистрируемых разрядов в июле (наиболее грозовой месяц для Якутии) менялось от 10 (ночные часы) до 2000 разр./ч (17-18 LT). Во время наиболее мощной грозовой активности на территории радиусом 1000 км регистрировалось до 3500 разр./ч. Распределение летних атмосфериков по числу периодов в 95 % лежит в пределах 1-7 (максимальное число атмосфериков имеет 3 периода).

Для выделения грозовых ячеек и объединяющих их грозовых очагов нами применяется кластерный анализ. Проведено почасовое объединение зарегистрированных разрядов, обусловленное статистически недостаточным объемом данных на более малых интервалах времени. Разряды группировались по признаку удаленности друг от друга. Грозовой ячейкой считается кластер с удалением между разрядами 50 км, в который за 1 ч попало более трех разрядов. Наши наблюдения показывают, что в среднем за 1 ч в ячейке бывает 20 разрядов. Количество ячеек в очаге около 2 в начальной и заключительной стадиях и 7 в средней стадии. Центр очага – центр тяжести кластера. Разница в расположении центра очага в течение двух последовательных часовых выборок характеризует смещение очага в течение 1 ч. В среднем в июле (наиболее грозовом месяце) основное число атмосфериков рождается ежедневно в 6 мощных грозовых очагах диаметром 50 – 250 км

[3]. Наиболее мощные грозовые очаги достигают размеров 400 км. Мощные грозовые очаги могут существовать, немного смешаясь и затухая в ночное время, в течение нескольких суток. Количество атмосфериков, рожденных отрицательными разрядами «облако-земля», приблизительно в 2 раза превосходит число атмосфериков, рожденных положительными разрядами. Обычно грозовые очаги состоят из 2-10 ячеек, наиболее часто из 4 ячеек. Всего нами проанализировано 105 наиболее мощных грозовых очагов за 3 летних месяца. Средняя длительность мощной грозы 5 ч. Количество грозовых разрядов в очаге меняется от 60 разр./ч в начальной стадии до 100 разр./ч в средней и снижается до 40 разр./ч в заключительной. Очаги перемещаются в течение 1 ч в среднем на 50-100 км. Однако это смещение чаще всего хаотическое и общее смещение за время жизни (в среднем 5 ч) ~ 220 км, т.е. грозовой фронт движется со скоростью в среднем 44 км/ч. При движении грозового фронта образуются новые грозовые очаги, а предыдущие затухают.

Интенсивность разрядов на 100 км<sup>2</sup> в час *I* изменяется от 0,04 до 14. Но основная масса (90% значений) находится в диапазоне от 0,1 до 7 разр./100 км<sup>2</sup> в час. С увеличением площади очагов *S* интенсивность разрядов падает как  $I = 168 S^{-0.68}$  (от 6 при  $S = 100 \text{ км}^2$  до 0,3 при  $S = 10000 \text{ км}^2$ ). При дальнейшем увеличении площади очагов интенсивность остается в среднем неизменной. Падение интенсивности разрядов с увеличением площади очага, вероятно, объясняется увеличением пространств между грозовыми тучами, где разряды отсутствуют. В среднем мощные (длительные) грозовые очаги в течение часа занимают площадь ~ 5000 км<sup>2</sup> в начале своего развития и ~ 10000 км<sup>2</sup> в средней стадии.

Один из основных максимумов грозовой деятельности приходится на Алданское нагорье. Второй мощный очаг находится к западу от Якутска на Приленском плато. Еще один небольшой максимум отмечается в юго-западных предгорьях Верхоянского хребта. Эти очаги устойчиво наблюдаются нами каждый год, начиная с начала наблюдений в 1993 г. по 2003 г. [2-4]. Остальная же территория Якутии характеризуется непостоянством в возникновении гроз. А на северо-востоке очень редки даже отдельные грозовые разряды. Полученные пространственные распределения в целом говорят о том, что днем число гроз больше на Среднесибирском плато и в предгорьях хребтов на юге и востоке Якутии. Таким образом, максимальное число очагов гроз на территории Якутии наблюдается в

южной и западной частях, где проходят или предполагается прокладка трубопроводов.

### Влияние гроз на субавроральные трубопроводы

Одним из самых интенсивных очагов с повышенной продолжительностью гроз является очаг в юго-восточной части Среднесибирского плоскогорья (западная половина междуречья Лены, Вилюя и Нижней Тунгуски), расположенный в районе г. Мирный и пос. Тас-Юрях, где ранее были проведены подземные ядерные взрывы. Ответить на вопрос, существует ли связь указанных фактов, в настоящее время затруднительно. В целях определения грозовых токовых нагрузок на нефте- и газопроводы в данном регионе в середине лета 2001 г. были проведены полевые измерения электромагнитных полей в окрестности трубопроводов, расположенных в условиях многолетней мерзлоты.

Измерения электромагнитного поля от наведенных в трубе токов проводились с помощью двух горизонтальных магнитных рамочных антенн, расположенных на различном удалении от трубопровода. Наличие гроз в окрестности подтверждается грозопеленгатором, работавшим около Якутска на радиополигоне ИКФИА.

Грозовой фронт движется со скоростью в среднем 44 км/ч, а средняя площадь грозы 5000 - 10000 км<sup>2</sup>. Таким образом, грозовые разряды от одной грозы на субполярных широтах наблюдаются в радиусе 10 км от трубопровода, даже при поперечном движении их фронтов, в среднем 1–2 ч.

Во время измерений, в районе г. Мирного и пос. Тас-Юрях, в июле 2001 г. наблюдались два близких грозовых облака. Одно облако находилось около 2 км от места наблюдения, расположенного на трубопроводе. Вторая гроза пересекла трубопровод на расстояние 3-10 км от места наблюдения. Визуально наблюдались вспышки молний от межоблачных и наземных разрядов. Расстояние оценивалось по разности времени между вспышкой молнии и громом. Сигнал от токов, текущих по трубопроводу, в рамку, расположенную на удалении 3,5 м от трубопровода, был больше приблизительно в 63 раза сигнала, наводимого в рамке, удаленной от трубопровода на 150 м. Аналогичные наблюдения проведены на газопроводе в 30 км от г. Якутска для грозы, удаленной на 5-10 км.

Оценим силу тока в трубопроводе, наведенную грозовыми разрядами, используя полученные экспериментальные данные. Введем следующие обозначения:  $I$  – сила тока в трубопроводе;  $R$  – сопротивление первой рамки;  $r$  – сопротивление

шунта;  $L$  – индуктивность первой рамки;  $L_1$  – индуктивность обмотки первого трансформатора  $\omega$  – частота максимума в спектре сигнала;  $l$  – расстояние от трубопровода до первой рамки;  $S$  – эффективная площадь первой рамки;  $U$  – напряжение на выходе от первой рамки. Пользуясь законом электромагнитной индукции, для оценки величины индуцированного в трубопроводе тока имеем следующую формулу:  $\frac{dI}{dt} = U \frac{2\pi l R_z}{\mu \mu_0 S R_e}$ , где в гармоническом приближении для  $U$

$$R_e = \frac{r \pi L_1}{r + \pi L_1}, \quad R_z = R + \pi L + R_e.$$

Отсюда для силы тока в том же гармоническом приближении вытекает выражение:

$$I = U \frac{2\pi d R_z}{\mu \mu_0 S R_e}.$$

При подстановке численных значений параметров экспериментальной установки последняя формула дает следующую оценку для силы тока в трубопроводе:  $I \approx 0,33$   $A$ , где  $u$  – напряжение сигнала на входе АЦП.

По последней формуле сила тока в трубопроводе от грозовых разрядов, происходивших над трубопроводом на расстояниях порядка 3-7 км от точки наблюдения, достигала значений около 10  $A$ , в нескольких случаях эта величина могла быть превышена, поскольку в целях сохранения живучести аппаратуры применялось ограничение на максимальную величину регистрируемого сигнала.

### Математическая модель

Приведем расчеты волны тока и напряжения, возникающего в субавроральном трубопроводе при межоблачном разряде молнии над ним. Расчеты проведены в рамках модели [5], не учитывающей зависимость тока молнии от времени, при различной геометрии расположения грозовых облаков. В этой модели, отличающейся простотой подхода, нет необходимости интегрирования системы уравнений Максвелла с учетом граничных условий на проводниках.

Трубопровод моделируется тонким бесконечным проводником, расположенным на высоте  $l$  над проводящим полупространством, параметр  $l$  характеризирует толщину многолетнемерзлого слоя. Проводник характеризуется распределенными параметрами  $R$ ,  $C$ ,  $L$ ,  $G$  – сопротивлением, емкостью, индуктивностью и коэффициентом утечки, рассчитанными на единицу длины. На высоте  $l$  над полупространством введем декартову систему координат, пусть ось  $x$  и трубопровод

совпадают, ось  $z$  направлена перпендикулярно полуплоскости. Грозовые облака моделируются двумя точечными зарядами  $Q$  и  $-Q$ , расположенными в точках с координатами  $(0, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$ . Следовательно, линия находится в поле зарядов  $Q$ ,  $-Q$  и их электростатических изображений.

На проводнике трубопровода электростатическим полем грозовых облаков индуцируются заряды, которые создают в трубопроводе такой потенциал, который компенсирует потенциал, создаваемый четырьмя точечными зарядами  $Q$ ,  $-Q$  и их электростатическими изображениями. В момент времени  $t=0$  заряды мгновенно исчезают (облака разряжаются), тогда вдоль трубопровода при  $t>0$  пойдет волна тока («разбегание» индуцированных зарядов), которая описывается системой телеграфных уравнений.

Таким образом, для определения силы тока  $i(x, t)$  и напряжения  $u(x, t)$  в трубопроводе после такого разряда грозовых облаков получается задача Коши для системы телеграфных уравнений:

$$\begin{cases} u_x + L_i t + R i = 0, & -\infty < x < \infty, \quad t > 0, \\ i_x + C u_t + G u = 0, \\ u(x, 0) = f(x), \quad i(x, 0) = 0. \end{cases}$$

Начальные напряжения получаются из предыдущих рассуждений:

$$f(x) = f_1(x) + f_2(x),$$

$$\text{где } f(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{Q}{\sqrt{z_1^2 + x^2 + y_1^2}} - \frac{Q}{\sqrt{(2l+z_1)^2 + x^2 + y_1^2}} \right],$$

$$f_2(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{-Q}{\sqrt{z_2^2 + (x-x_1)^2 + y_2^2}} + \frac{Q}{\sqrt{(2l+z_2)^2 + (x-x_1)^2 + y_2^2}} \right].$$

В случае выполнения условия отсутствия искажения  $RC = LG$  решение задачи получается стандартными методами математической физики и имеет вид:

$$u(x, t) = \frac{1}{2} e^{-\frac{Rt}{L}} [f(x-at) + f(x+at)],$$

$$i(x, t) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\frac{Rt}{L}} [f(x-at) - f(x+at)],$$

$$\text{здесь } a = \frac{1}{\sqrt{CL}}.$$

По этим формулам проведены численные расчеты при следующих значениях параметров:  $Q = 50$  Кл,  $l = 250$  м,  $L = 10^{-7}$  Гн,  $R = 10^{-10}$  Ом,  $C = 10^{-10}$  Ф.

Переход к безразмерным переменным проводится по формулам:

$$\bar{x} = \frac{x}{r}, \quad \bar{t} = \frac{at}{r}, \quad r = 1000 \text{ м}, \quad \bar{u}(\bar{x}, \bar{t}) = \frac{u(\bar{x}, \bar{t})}{b},$$

$$\bar{i}(\bar{x}, \bar{t}) = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{i(\bar{x}, \bar{t})}{b}, \quad b = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Во всех проведенных расчетах получено, что волновой процесс распространения тока и напряжения вдоль трубопровода носит сложный характер. Ниже приведены некоторые характерные результаты при 4 различных расположениях грозовых облаков относительно трубопровода. Все данные приведены для безразмерных переменных, для краткости черточки над ними не написаны.

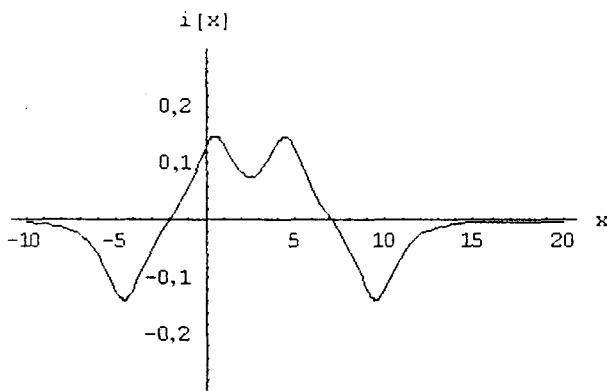
1. Удар молнии параллельно трубопроводу:  $y_1 = y_2 = 0$ ,  $z_1 = z_2 = 1,5$ ,  $0 < x_2 < 10$ . Для примера на рис. 1 приведено распределение силы тока вдоль трубопровода для  $x_2 = 5$  при  $t = 4,5$ . Максимальное значение силы тока получается при  $x_2 = 5,5$  и равно  $I_{max} = 0,297291$ , при этом  $x = 2,75$ ,  $t = 2,733$ . Это значение получается как результат сложения прямой и обратной волн в одной определенной точке ( $x = 2,75$ ). При увеличении или уменьшении параметра  $z_1 = z_2$  значение  $\bar{I}_{max}$  соответственно или уменьшается, или увеличивается.

2. Удар молнии над трубопроводом под углом:

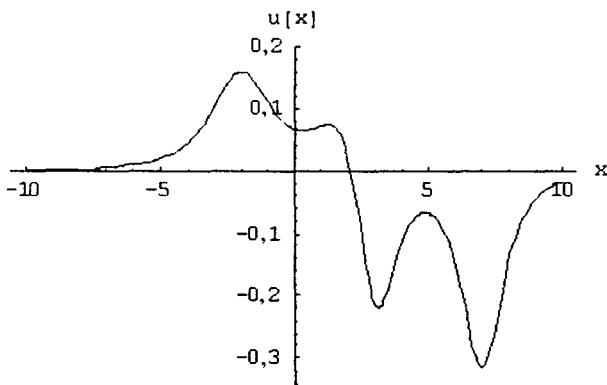
$$y_1 = y_2 = 0, \quad z_1 = 1,5, \quad \frac{z_1}{3} < z_2 < 2z_1, \quad 0 < x_2 < 10. \quad \text{На}$$

рис. 2 приведено распределение напряжения вдоль трубопровода для  $x_2 = 5$ ,  $z_2 = \frac{2z_1}{3} = 1$ , при  $t = 2$  распределение силы тока также носит сложный характер. При  $z_2 = \frac{2z_1}{3} = 1$  максимальное значение силы тока получается при  $x_2 = 4,5$  км и равно  $I_{max} = 0,452$ , при  $x = 2,258$ ,  $t = 2,236$ . Амплитуды получившихся волн различны по сравнению с ранее полученными в положении молнии 1, т.е. при изменении расположения облаков изменяется и характер распределения волн силы тока и напряжения.

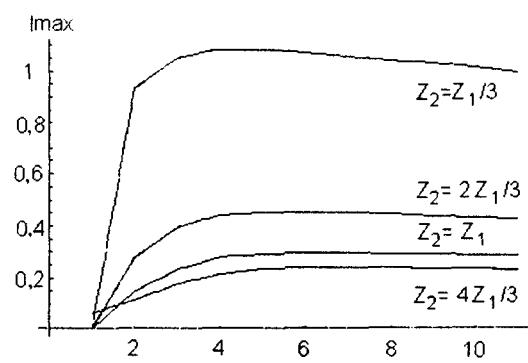
3. Удар молнии поперек трубопровода:  $-1,5 < y_1 < 1,5$ ,  $C = 10^{-10}$  Ф,  $-1,5 < y_1 < 1,5$ ,  $\frac{z_1}{3} < z_2 < 2z_1$ ,  $0 < x_2 < 10$ . Для примера на рис. 3 приведен график зависимости максимального значения силы тока от расстояния  $x_2$  и от высоты  $z_2$  при  $y_1 = 0,2$ ,  $y_2 = -0,8$ . Максимальное значение до определенной точки возрастает и начинает убывать. Численные результаты максимального значения силы тока приведены в таблице.



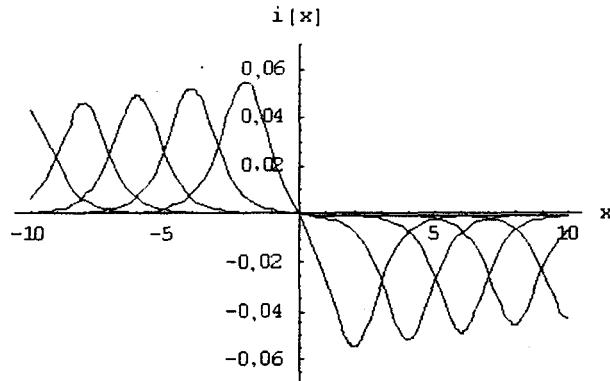
**Рис. 1.** Распределение силы тока  $I$  вдоль трубопровода  $x$  при  $x_2=5$ ,  $t=4,5$ ,  $y_1=y_2=0$  и  $z_1=z_2=1,5$ . Удар молнии параллельно трубопроводу. Данные приведены для безразмерных переменных



**Рис. 2.** Распределение напряжения  $U$  вдоль трубопровода  $x$  при  $y_1=y_2=1,5$ ,  $z_1=1,5$ ,  $x_2=5$ ,  $z_2=2z_1/3=1$  и  $t=2$ . Удар молнии над трубопроводом под углом. Данные приведены для безразмерных переменных



**Рис. 3.** Зависимость максимального значения силы тока  $I_{\max}$  от расстояния  $x_2$  при  $y_1=0,2$  и  $y_2=-0,8$ . Удар молнии поперек трубопровода. Данные приведены для безразмерных переменных



**Рис. 4.** Распределение силы тока  $I$  вдоль трубопровода  $x$  при  $x_2=0$ ,  $y_1=0$ ,  $y_2=1$  и  $z_1=z_2=1,5$ . Шаг по времени равен  $\Delta t=2$   $0 < t < 10$ . Удар молнии перпендикулярно трубопроводу. Данные приведены для безразмерных переменных

**Максимальные значения силы тока  $I_{\max}$ , точка  $x$  и время  $t$  его наблюдения в зависимости от положения облаков при ударе молнии поперек трубопровода**

$I_{\max}$	$y_1$	$y_2$	$x_2$	$z_1$	$z_2$	$x$	$t$
1,06491	0	0,5	3,5	1,5	0,5	1,787	1,711
0,39813	1	0	4,5	1,5	1	2,265	2,23
0,21033	1,5	0	6	1,5	1,5	3,017	2,969
0,2136	0	-1	6	1,5	2	2,979	2,968
0,43705	0,2	-0,2	4,5	1,5	1	2,25	2,236
0,31944	0,2	-0,8	4,5	1,5	1	2,5048	2,486
0,54185	1,5	0,5	4	1,5	0,5	2,05	1,939

4. Удар молнии перпендикулярно трубопроводу:  $-1,5 < y_1 < 1,5$ ,  $-1,5 < y_2 < 1,5$ ,  $z_1 = 1,5$ ,  $\frac{z_1}{3} < z_2 < 2z_1$ ,  $x_2 = 0$ . Для примера на рис.4 приведены графики силы тока при  $y_1 = 0$ ,  $y_2 = 1$ ,  $z_1 = z_2 = 1,5$ ,  $-10 < x < 10$ , шаг по времени  $\Delta t = 2$ ,  $0 < t < 10$ . В этом случае максимумы силы тока  $I_{\max} = 0,05$  и  $I_{\max} = -0,05$  получаются при  $x = 1,93$  и  $x = -1,93$ ,  $t = 1,92$ . Модули численных значений обратной и прямой волн равны.

## Выводы

Очаги гроз на территории Якутии имеют « пятнистость ». Причиной этой неоднородности являются рельеф местности и климатические условия, определяющие различие условий развития грозовых очагов. Как правило, гроз много либо в предгорьях, либо в местностях с резким изменением высот, но ниже высоты 500 м.

При движении грозового фронта образуются новые грозовые очаги, а предыдущие обычно медленно затухают.

Анализ полученных численных результатов показывает, что распределения токов и напряжений вдоль проводника (трубопровода), индуцированных при межоблачном разряде молнии, являются более сложными, чем при ударе молнии в землю. Например, имеется распространяющийся вдоль проводника фронт волны с нулевым значением тока. В рассматриваемой задаче критическими параметрами являются максимальные значения напряжений и токов. Расчетами установлены закономерности изменения этих параметров в зависимости от геометрии расположения облаков. Например, максимальное значение силы тока зависит от расстояния между облаками и проводником (трубопроводом). Чем ближе расположены облака, тем меньше амплитуда возникающих волн силы тока и напряжения.

Косвенные измерения токов, текущих по металлической трубе нефтепровода во время грозы, дают величины ~ 5 – 10 А. Такие значения тока обусловлены тем, что в это время (к середине лета) земля достаточно хорошо протаяла, и появились большие токи утечки. Поэтому можно считать, что летние грозы для эксплуатации газо- и нефтепроводов безопасны. Опасны весенние грозы и в начале лета, когда токи утечки слабы и токовые перегрузки могут быть весьма большими. Это подтверждается числом аварий. Нужно учесть, что определенные нами токи вызваны наведенными сигналами от грозовых разрядов, происходящих в полосе 10 км от газопровода, а не от непосредственных попаданий молний в газопровод. Поэтому эти токи достаточно регулярны. Для обеспечения безопасности функцио-

нирования магистральных газо- и нефтепроводов, проходящих в районах вечной мерзлоты, можно рекомендовать делать диэлектрические вставки в металлические нитки продуктопроводов, аналогично опыту Скандинавских стран.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 03-02-96060-р2003 арктика-а и гранта ур.02.01.025 конкурса "Университеты России".

### **Литература**

1. Козлов В.И., Муллаяров В.А., Лаптев А.Д. и др. Грозовая активность в Якутии по наблюдениям с помощью однопунктового грозопеленгатора-дальномера // Известия АН. Физика атмосферы и океана. – 1996. – Т.32, №2. – С. 216-221.
2. Козлов В.И., Муллаяров В.А. Инструментальные наблюдения грозовой деятельности в Якутии в 1993-1994 гг. // Метеорология и гидрология. – 1996. – №2. – С.105-109.
3. Козлов В.И., Муллаяров В.А., Васильев А.Е. Характеристики грозовых очагов по инструментальным наблюдениям в Якутии в 1993-2001 гг. // Метеорология и гидрология. – 2003. – №2. – С. 39-45.
4. Васильев А.Е. Пеленгационные исследования грозовой деятельности на территории Якутии // Наука и образование. – Якутск, 2000. – №4. – С.21-23.
5. Григорьев Ю.М., Наумов В.В., Николаев П.И. Исследование влияние электромагнитного воздействия на кабельные линии // Физика высокочиротной ионосферы и распространение электромагнитных волн. – Якутск, 1988. – С. 126-132.

