

УДК 551.345:519.816

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАЛЕДЕЙ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Шейн Н.С., Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Ефремов П.В., Слепцов О.И.

*ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем
Севера имени В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru*

Магистральные трубопроводы, проходящие по территории распространения криолитозоны, подвергаются влиянию различных негативных опасных геологических процессов (ОГП), таких как термокарст, пучение, эрозия, солифлюкция и иные, в том числе и наледеобразование. Цель данной статьи – исследование влияния наледеобразования на работоспособность магистральных трубопроводов на примере магистрального газопровода «Сила Сибири». Наледи – слоистые ледяные массивы, возникающие при замерзании эпизодически выливающих грунтовых или поверхностных вод. Наледи – это особо опасное гляциальное явление, негативное влияние которого представляется: а) непредвиденным затоплением территории в холодное время года; б) кристаллизацией воды и появлением термодинамического и статического давления льда; в) образованием ледяных барьеров и увеличением количества скользких дорог, тротуаров, грунтовых покрытий; г) развитием сопутствующих опасных процессов, таких как морозное растрескивание, криогенное волнение, термоэрозия, образование нагнетаемого льда, неравномерные осадки земной поверхности и т.д. Влияние наледей отрицательно сказывается на безопасности и работоспособности магистральных трубопроводных систем, вызывает необходимость повышенных требований к материалам, конструкциям, технологиям прокладки, отрицательно воздействует на экологическую обстановку региона в случае возникновения аварийных ситуаций. В данной работе на основе экспертного анализа определены основные факторы, влияющие на процесс наледеобразования, оценена степень воздействия наледей на работоспособность магистрального трубопровода с использованием методов нечеткой логики и сформированных правил нечеткого вывода. Данный подход позволяет определить опасные участки для проведения предупреждающих мероприятий по уменьшению риска появления чрезвычайных ситуаций. Также возможно смоделировать последствия аварийных ситуаций и локализовать последствия исходя из погодных условий и территории распространения.

Ключевые слова: наледи, магистральные трубопроводы, наледная опасность, подземные воды, нечеткая логика, функция принадлежности, лингвистические переменные, база нечетких правил

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ICING ON THE FUNCTIONING OF MAIN PIPELINES

Shein N.S., Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Efremov P.V., Sleptsov O.I.

*Larionov's Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS, Yakutsk,
e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru*

The main pipelines passing through the distribution area of the permafrost zone are affected by various negative processes, such as, for example, thermokarst, swelling, erosion, solifluction, etc., including ice formation. The purpose of this article is to study the effect of icing formation on the performance of trunk pipelines using the Power of Siberia trunk gas pipeline as an example. Icing is a layered ice mass formed when periodically spilling underground or surface water freezes. They are a particularly dangerous glacial phenomenon, the negative impact of which is determined by: a) unexpected flooding of the territory in the cold season; b) crystallization of water and the appearance of static and thermodynamic pressure of ice; c) the formation of ice barriers and increased slippery roads, sidewalks, ground coverings; d) the development of associated hazardous processes – cryogenic heaving, frost cracking, thermoerosion, the formation of injection ice, uneven precipitation of the day surface, etc. The influence of ice has a negative impact on the performance of main pipeline systems, causes the need for increased requirements for materials, structures, and laying technologies, and negatively affects the environmental situation of the region in the event of emergencies. In this paper, based on the application of fuzzy logic methods, the main factors affecting the process of icing are identified, the degree of influence of ice on the performance of the main pipeline is estimated, the rules of fuzzy inference are developed to minimize the effect of ice formation and identify hazardous areas for preventive measures to reduce risk emergencies.

Keywords: icing, main pipelines, ice hazard, underground water, fuzzy logic, membership function, linguistic variables, fuzzy rule base

Анализом влияния наледей на инженерные сооружения занимались различные исследователи. В [1] показано, что воздействие наледей снижает прочность инженерных сооружений и их несущую способность, также образование наледей и их активизация приводят к изменению

геокриологических условий; предложена классификация наледей по морфологическим параметрам – объему, площади и мощности. В [2] рассмотрено влияние наледей и грунтовых вод на процесс формирования мерзлого массива в грунте и инженерные сооружения численными методами.

На основании практики многолетних изучений наледей, в разные годы проводившихся в районах Сибири и Дальнего Востока (в том числе Якутии и Амурской области) В.А. Алексеевым и Н.Ф. Савко [3–6], определено, что на величину формирующихся наледей и условия их развития главным образом влияют следующие климатические факторы: количество выпадающих атмосферных осадков в предшествующий наледообразованию теплый период времени; температура зимнего воздуха, мощность снежного покрова. В соответствии с этим положением анализ межгодовой изменчивости в наших исследованиях приводится по данным факторам.

Наледи – слоистые ледяные массивы, возникающие при замерзании эпизодически выливающих грунтовых или поверхностных вод. Наледи – это особо опасное гляциальное явление, негативное влияние которого представляется: а) непредвиденным затоплением территории в холодное время года; б) кристаллизацией воды и появлением термодинамического и статического давления льда; в) образованием ледяных барьеров и увеличением количества скользких дорог, тротуаров, грунтовых покрытий; г) развитием сопутствующих опасных процессов, таких как морозное растрескивание, криогенное волнение, термоэрозия, образование нагнетаемого льда, неравномерные осадки дневной поверхности и т.д.

Наледная опасность – это угроза жизни и здоровью человека, его экономической деятельности, работе инженерных сооружений, животному и растительному миру. Границы распространения наледной опасности обуславливаются многими факторами, включая деятельность человека. В некоторых случаях, например при сбросах бытовых и промышленных вод, строительстве дорог, плотин, застройке местности, развитие наледей вызывается намеренно. Иногда такие необдуманные мероприятия могут привести к большим стихийным бедствиям. Учет наледей и наледных процессов требуется на всех этапах бытового и инженерного освоения территории. Для этого применяют такие критерии оценки наледной опасности, как: время вероятного появления, возможность возникновения наледей в том или ином месте, длительность развития и разрушения ледяных массивов, их толщина, объем, площадь и особенности взаимодействия с хозяйственными объектами [5].



Рис. 1. Наледь на участке МГ «Сила Сибири»

Материалы и методы исследования

Наледи оказывают большой вред инженерным сооружениям, также они создают трудности при их использовании.

Факторы негативного влияния наледей: 1) закупорка льдом отверстий малых искусственных сооружений и затруднение пропуска весенних вод; 2) затопление проезжей части подходов к искусственным сооружениям и затруднение движения транспорта; 3) деформирование искусственных сооружений при образовании около них наледных бугров; 4) создание условий для размыва конусов и земляного полотна подходов, а также изменение конфигурации русла водотока при стоке весенних вод по образовавшемуся льду.

Главными условиями формирования и развития наледей являются: 1) мощность льда; 2) площадь льда; 3) источники наледообразующих вод (надмерзлотные, подмерзлотные, русловой сток, несквозные талики, глубокий подмерзлотный сток, пластово-поровые воды таликов, ледоснеговые); 4) грунты (пески, супеси, суглинки, торф); 5) наличие наледных бугров; 6) расстояние от трубы до бугра; 7) долины рек (долины I–II–III порядка, верховья долин, горные долины).

Наледи можно классифицировать по: а) месту отложения; б) степени опасности; в) типу наледообразующих вод; г) происхождению; д) размерам; е) длительности существования [7].

Влияние наледей отрицательно сказывается на безопасности и работоспособности магистральных трубопроводных систем, вызывает необходимость повышенных требований к материалам, конструкциям, технологиям прокладки; они отрицательно воздействуют на экологическую обстановку региона в случае возникновения аварийных ситуаций.

По степени опасности для функционирования технических сооружений наледи были классифицированы на следующие виды: слабые; средние; опасные; сильно опасные; катастрофические.

В данной работе рассматривается влияние наледной опасности на участки прохождения трубопровода и производится их ранжирование по степени опасности с использованием экспертного анализа и нечеткой логики. Предложенная модель выполняется в среде Fuzzy Logic MATLAB с применением алгоритма Мамдани. Результаты показывают, что предлагаемая модель может быть использована как инструмент анализа определения степени наледной опасности на различных участках трубопровода.

Результаты исследования и их обсуждение

Для схемы нечеткого вывода в данной работе мы используем метод Мамдани. Методом активации будет MIN. Далее определим методы агрегирования подусловий. Для метода агрегирования используем операцию min-конъюнкции, в качестве логической связки для подусловий применяется только нечеткая конъюнкция (операция «И»), для метода дефаззификации – метод

центра тяжести, для аккумуляции заключений правил – метод max-дизъюнкции [8].

Нечеткая модель (наледи) разрабатывалась при помощи среды MATLAB. Для этого в редакторе FIS были определены семь входных переменных: «площадь льда», «мощность льда», «источники», «грунты», «наличие наледных бугров», «расстояние от трубы до бугра», «долины рек» и одна выходная: «степень опасности». Графический интерфейс редактора FIS представлен на рис. 2.

Предложенную модель выполним в среде Fuzzy Logic MATLAB, используя алгоритм Мамдани. По умолчанию оставим параметры данной разрабатываемой нечеткой модели. Для метода агрегирования (max), метода импликации (min), логических операций (min для нечеткого логического И и max для ИЛИ) и для метода дефаззификации выберем метод центра тяжести [8–10].

Затем для каждой входной лингвистической переменной и одной выходной переменной системы нечеткого вывода определим функции принадлежности термов. Для этой цели воспользуемся редактором функций принадлежности среды Fuzzy Logic MATLAB. На рис. 3 представлен интерфейс редактора функций принадлежности для входной лингвистической переменной «грунты».

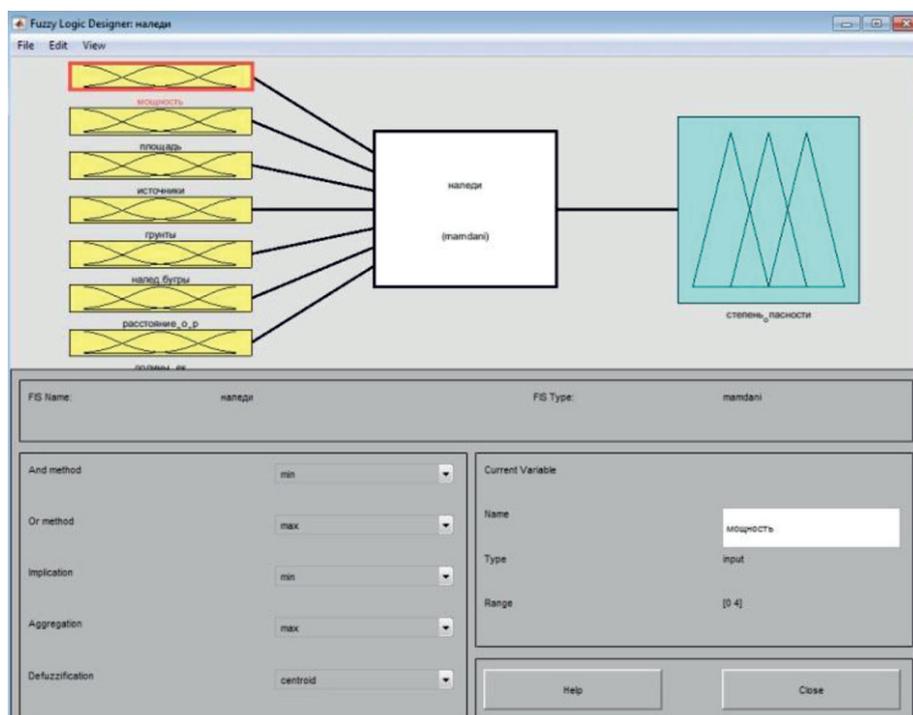


Рис. 2. Графический интерфейс редактора FIS

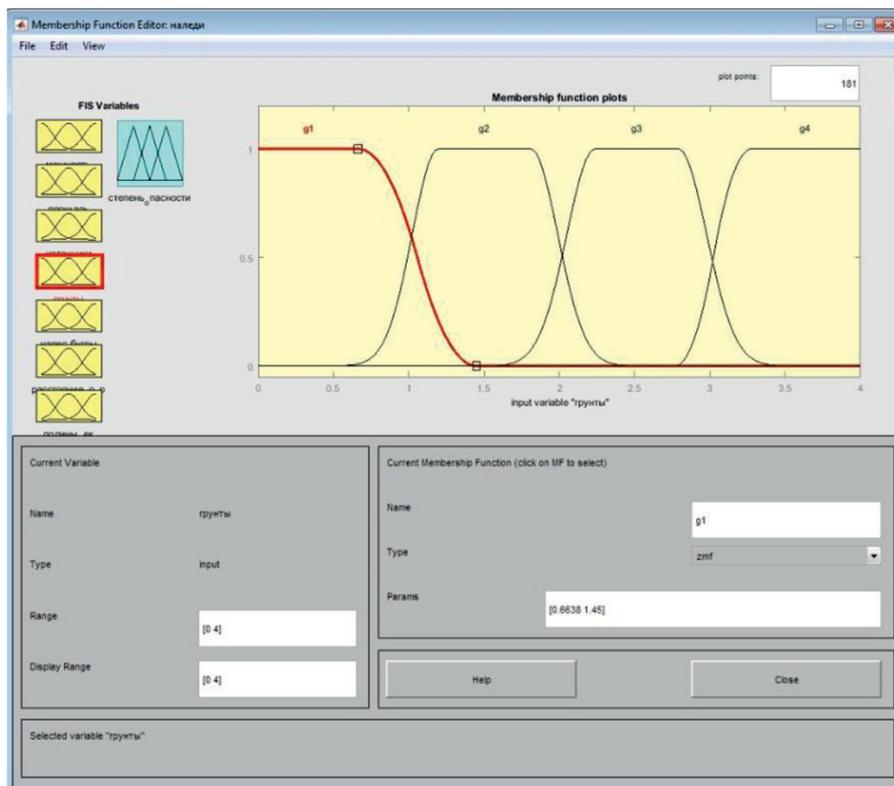


Рис. 3. Функции принадлежности лингвистической переменной «грунты»

Влияние наледной опасности на трубопровод оценивалась по шкале от 0 до 5 баллов. В качестве примера рассмотрим участок на р. Аччыгый Лэглэгэр. В результате дефаззификации при рассмотрении примера получим, что при следующих значениях факторов: мощность наледи 2,6 м; вид грунта супесь; расстояние от трубы до бугра <50 м; площадь наледи 129 482,3 м²; наледные бугры есть; долины 1–2-го порядка; источники (подмерзлотные воды) – значение наледной опасности будет равно 4,28. Для другого примера возьмем участок на р. Эргэ: мощность наледи 0,95 м; вид грунта слабозаторфованная супесь; расстояние от трубы до бугра >50 м; площадь наледи 6063,158 м²; наледные бугры есть; долины 1–2-го порядка; источники (глубокий подмерзлотный сток) – значение наледной опасности будет равно 2,5. Визуализация нечеткого вывода приведена на рис. 4.

На основании справочных и научно-методических материалов, а также данных, полученных из анализа опроса экспертов, была сформирована база правил. На основе экспертного анализа определены основные факторы, влияющие на процесс наледообразования, оценена степень воздействия наледей

на работоспособность магистрального трубопровода с использованием методов нечеткой логики и сформированных правил нечеткого вывода. Данный подход позволяет определить опасные участки для проведения предупреждающих мероприятий по уменьшению риска появления чрезвычайных ситуаций. Нечеткая модель была выполнена с применением алгебры нечетких множеств, нечеткой логики и базы правил на этапе нечеткого вывода каждой входной лингвистической переменной, полученной в процессе фаззификации.

С использованием данного подхода были рассмотрены влияния наледной опасности на участки магистрального трубопровода (таблица).

Появление факторов наледообразования при строительстве магистральных трубопроводов наиболее вероятно при:

- а) пересечении склонов, многолетнемерзлых грунтов при расчистке просеки;
- б) наличии на склонах большого количества ручьев и заболоченности;
- в) недостаточном количестве водопропускных сооружений;
- г) прокладке трубопроводных систем ниже глубины сезонного оттаивания;
- д) нарушении стока грунтовых вод и т.п.

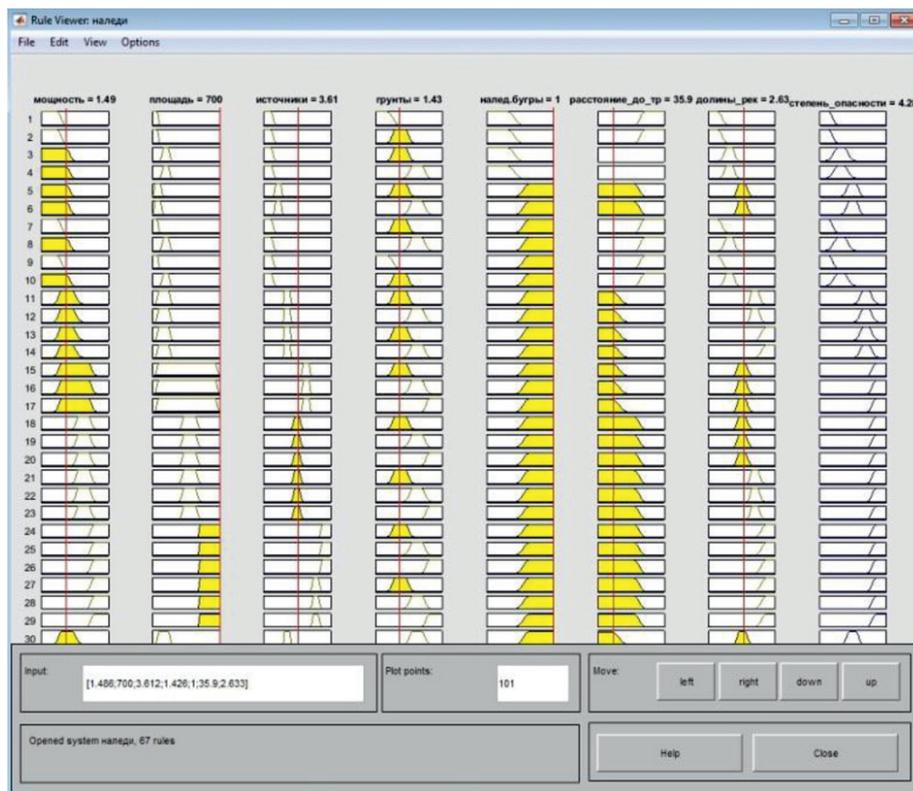


Рис. 4. Визуализация нечеткого вывода

Исходные данные участков МГ с развитием процессов наледобразования и оценка степени интенсивности воздействия на элементы МГ

Участок	Порядок долины	Источники	Мощность наледи, м	Наледные бугры	Расстояние от гряды до бугра, м	Площадь наледи, м ²	Грунты
Аччыгый Лэглэгэр	1–2	5-6 (PM)	2,6	есть	<50	129482,3	Супесь
Улахан Лэглэгэр	1–2	3-4 (NT)	1,3	есть	<50	74769,23	Песок с примесью торфа
Тит	1	3-4 (NT)	0,75	есть	<50	15600	Супесь
Эргэ	1–2	2-3 (GPS)	0,95	есть	>50	6063,158	Слабозаторфованная супесь
Л. Бурухинский	1–2	3-4 (NT)	1	нет	–	10650	Супесь

Техногенными факторами наледобразования часто являются искусственные сооружения, если они затрудняют пропуск воды, особенно при скоплении в них шуги [11, 12].

Заключение

На основании литературно-справочных данных и экспертного опроса, с использованием данных из БД геотехнического

мониторинга были определены основные факторы, влияющие на процесс наледообразования, и сформулированы критерии оценки опасности участка МТ при интенсивном воздействии наледей на инженерные сооружения. С применением полученных критериев опасности были сформированы правила нечеткого вывода. Данный подход оценки влияния процесса наледообразования на участках трубопровода помогает оценить степень влияния наледообразования на элементы магистрального газопровода с целью проведения предупреждающих мероприятий по уменьшению источников риска на разных участках. Безопасность магистральных трубопроводов определяется наличием современных методов диагностики состояния трубопроводных конструкций в условиях меняющегося рельефа и методами оценки его влияния на работоспособность конструкций.

Работа выполнена при поддержке программы НИР № АААА-А17-117040610321-2.

Список литературы / References

1. Шестернев Д.М., Верхотуров А.Г. Воздействие наледей на инженерные сооружения // Вестник Забайкальского государственного университета. 2016. Т. 22. № 10. С. 30–40. DOI: 10.21209/2227-9245-2016-22-10-30-40.
2. Shesternev D.M., Verkhoturov A.G. The effects of icings on engineering facilities // Vestnik Zabaykal'skogo gosuniversiteta. 2016. V. 22. № 10. P. 30–40 (in Russian).
3. Permyakov P.P., Vinokurova T.A., Popov G.G. Effect of Ice on the Heat-Moisture Regime of Soil Foundation of Gas Pipeline. International science and technology conference «FarEast-Con-2019» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 753 (2020) 052005. DOI: 10.1088/1757-899X/753/5/052005.
4. Алексеев В.Р., Савко Н.Ф. Теория наледных процессов. М.: Наука, 1975. 205 с.
5. Alekseev V.R., Savko N.F. Theory of icing processes. M.: Nauka, 1975. 205 p. (in Russian).
6. Алексеев В.Р. Проблемы инженерного освоения наледных участков речных долин // Криосфера земли. 2017. Т. XXI. № 6. С. 65–75. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(65-75).
7. Alekseev V.R. Aufeis areas in river valleys: engineering development problems // Kriosfera zemli. 2017. V. XXI. № 6. P. 65–75 (in Russian).
8. Алексеев В.Р. Наледи. Новосибирск: Наука, 1987. 256 с.
9. Alekseyev V.R. Icings Novosibirsk: Nauka, 1987. 256 p. (in Russian).
10. Алексеев В.Р. Наледоведение. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2007. 438 с.
11. Alekseyev V.R. Icing science. Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2007. 438 p. (in Russian).
12. Меренцова Г.С., Медведев Н.В. Образование наледей и борьба с ними на автомобильных дорогах и искусственных сооружениях // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. Т. 3. № 3. С. 64–71.
13. Merentsova G.S., Medvedev N.V. The formation of icings and control on roads and artificial structures // Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii. 2017. V. 3. № 3. P. 64–71 (in Russian).
14. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
15. Leonenkov A.V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH. SPb.: BKhV-Peterburg, 2005. 736 p. (in Russian).
16. Аверкин А.Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Книга по требованию, 2012. 312 с.
17. Averkin A.N. Fuzzy sets in control and artificial intelligence models. M.: Kniga po trebovaniyu, 2012. 312 p. (in Russian).
18. Зак Ю.А. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных: Fuzzy-технологии. М.: URSS, 2013. 349 с.
19. Zak Yu.A. Decision-making in the context of fuzzy and blurry data: Fuzzy technologies. M.: URSS, 2013. 349 p. (in Russian).
20. Горбунова Л.Н., Панова З.Н. Анализ методов и средств борьбы с наледью и сосульками // Вестник КрасГАУ. 2012. № 8. С. 206–209.
21. Gorbunova L.N., Panova Z.N. Analysis of the techniques and means of fight with icing and icicles // Vestnik KrasGAU. 2012. № 8. P. 206–209 (in Russian).
22. Алексеев В.Р., Чжан Р.В. Криогенные строительные материалы. Якутск: Изд. Института мерзлотоведения СО РАН, 2011. 66 с.
23. Alekseev V.R., Chzhan R.V. Cryogenic building materials. Yakutsk: Izd. Instituta merzlotovedeniya SO RAN, 2011. 66 p. (in Russian).