

**Арктика и Антарктика***Правильная ссылка на статью:*

Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Фёдоров Я.В. — Радиус теплового влияния камер подземных сооружений криолитозоны // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 4. – С. 1 - 8. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.4.69178 EDN: XGQFQH URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=69178](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=69178)

## **Радиус теплового влияния камер подземных сооружений криолитозоны**

**Галкин Александр Фёдорович**

ORCID: 0000-0002-5924-876X

доктор технических наук



профессор, главный научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН  
677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ИМЗ СО РАН. Лаборатория геотермии криолитозоны

✉ afgalkin@yandex.ru

**Панков Владимир Юрьевич**

кандидат геолого-минералогических наук

доцент, кафедра "Автомобильные дороги и аэродромы", Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

677027, Россия, республика Саха(Якутия), г. Якутск, ул. Белинского, 58

✉ pankov1956@gmail.ru



**Фёдоров Ян Васильевич**

студент, кафедра "Автомобильные дороги и аэродромы", Северо-Восточный федеральный университет им.М.К.Аммосова

677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

✉ pankov1956@inbox.ru



[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

**DOI:**

10.7256/2453-8922.2023.4.69178

**EDN:**

XGQFQH

**Дата направления статьи в редакцию:**

25-11-2023

**Дата публикации:**

02-12-2023

**Аннотация:** Предметом исследований являются подземные сооружения криолитозоны (зоны многолетней мерзлоты). Проектирование подобных сооружений, в частности выбор объемно-планировочных решений, способов и средств крепления горных пород, в отличие от сооружений, размещаемых не в мерзлых породах, имеет ряд особенностей и связано с необходимостью учета зоны теплового влияния камер, эксплуатируемых с различными тепловыми режимами постоянно, либо периодически. Например, при изменении вида теплового режима в камерах в случаях природных или техногенных аварий и катастроф. Целью исследований было определение зоны теплового влияния одиночной камеры подземного сооружения криолитозоны в зависимости от вида используемого крепления (при наличии и отсутствии теплозащитного слоя) и длительности эксплуатационного периода, с использованием различных расчетных формул. Для достижений цели были исследованы три вида формул, определяющих зависимость безразмерного радиуса теплового влияния камер от критериев Фурье и Био. По формулам были проведены многовариантные расчеты, которые приведены в виде 3D графиков. Анализ выполненных расчетов показал, что расчеты по всем трем формулам дают близкие результаты в достаточно широком диапазоне изменения исходных параметров. Причем, формула, которая не учитывает влияние числа Био на радиус теплового влияния, дает определенный расчетный запас. В целом же, показано, что чем больше значение числа Био, тем меньше его влияние на глубину зоны теплового влияния подземной камеры. Малые значения числа Био (до 5-6) характерны для камер, которые закреплены набрызгбетоном или имеют специальные теплозащитные покрытия. Установлено, что при выборе объемно-планировочных решений подземных сооружений для оценки влияния теплового фактора вполне допустимым является использование приближенной формулы для оценки радиуса теплового влияния одиночной камеры. Научная новизна заключается в установлении области применения исследованных формул для прогноза радиуса зоны теплового влияния камер с различными видами крепления и тепловой защиты.

**Ключевые слова:**

подземное сооружение, криолитозона, тепловой режим, радиус теплового влияния, проектирование, расчетная формула, вид крепи, теплоизоляция, прогноз, расчет

**Введение.** Подземное пространство криолитозоны широко используется в хозяйственной деятельности человека с древних до настоящих времен, в основном в качестве подземных хранилищ и холодильников [1,2,3,4,5]. Прежде всего это связано с энергетической эффективностью подземных сооружений, по сравнению с аналогичными наземными объектами. Ранее нами была выполнена комплексная сравнительная оценка энергетической эффективности вида размещения различных объектов и сделан вывод, что по эксплуатационным энергетическим затратам складские объекты в криолитозоне, эксплуатирующиеся как при положительном, так и отрицательном тепловом режиме, целесообразно размещать под землей [6,7]. При этом, многие исследователи отмечают, что дополнительным эффективным способом управления энергетическими затратами в подземных сооружениях является использование теплоизоляции или специальной теплозащитной крепи [8,9,10,11]. Проектирование подземных сооружений криолитозоны, в

частности выбор объемно-планировочных решений, осуществляется с учетом трех определяющих эффективность и безопасность факторов: технологического, геомеханического и теплового ( Территориальные строительные нормы. Подземные объекты в горных выработках криолитозоны Якутии. ТСН-31-323-2002 Республики Саха (Якутия). Издание официальное. Якутск: Минстрой РС(Я). 2002. 24с. ). Причем, зачастую, эти факторы являются не просто взаимосвязаны, а по предъявляемым требованиям могут находятся в противоречии друг с другом, либо значительно улучшают или ухудшают технические решения, используемые для надежной и безопасной эксплуатации подземных сооружений [\[12,13,14\]](#). Поэтому правильной учет взаимосвязи и количественная оценка степени влияния отдельных определяющих факторов при проектировании подземных сооружений криолитозоны, является актуальной задачей.

**Целью** настоящей работы было определение зоны теплового влияния одиночной камеры подземного сооружения в зависимости от вида используемого крепления (наличие теплозащитного слоя) и длительности эксплуатационного периода, с использованием различных расчетных формул.

**Метод.** Для достижения цели воспользуемся методологией, изложенной в работах [\[15,16\]](#), которая основана на использовании безразмерных параметров искомых величин. Расчетные формулы имеют следующий вид [\[15\]](#):

|  |
|--|
| $(R - 1)^2 + \frac{4(R - 1)}{Bi + 1} - \frac{8}{(Bi + 1)^2} \ln \left[ 1 + \frac{(Bi + 1)(R - 1)}{2} \right] = 12Fo \quad (1)$ |
| $(R - 1)^2 + \frac{4(R - 1)}{Bi + 1} = 12Fo \quad (2)$   |
| $(R - 1)^2 = 12Fo \quad (3)$   |

В данных формулах использованы следующие обозначения. Критерий (число) Фурье -  $Fo = \alpha t / x_0^2$ ; критерий (число) Био -  $Bi = \alpha x_0 / \lambda$ ; безразмерный радиус теплового влияния камеры -  $R = \delta / x_0$ . Где:  $\alpha$  - коэффициент температуропроводности горных пород,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $t$  - время,  $\text{с}$ ;  $x_0$  - характерный размер (линейный масштаб),  $\text{м}$ ;  $\lambda$  - коэффициент теплопередачи от воздуха к породам,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ ;  $\delta$  - глубина зоны теплового влияния,  $\text{м}$ .

Диапазон изменения чисел Фурье для различных условий эксплуатации технических объектов в криолитозоне приведен в работе [\[17\]](#).

Отметим, что формула (3) для определения радиуса теплового влияния предусматривает его независимость от числа Био, и может быть получена из формулы (1) при условии, что число Био стремится к бесконечности. То есть, при граничных условиях первого рода. Значение числа Био, главным образом, определяется коэффициентом теплопередачи, который зависит от термического сопротивления крепи (специального защитного покрытия) и скорости воздуха в камере и может быть найден по следующей известной зависимости

$$\alpha = 1 / (1 / a_0 + R_T) \quad (4)$$

Где  $R_T$  - термическое сопротивление теплоизоляционного слоя или слоя крепи,  $\text{м}^2/(\text{Вт} \text{ } ^\circ\text{C})$ ;  $a_0$  - коэффициент конвективного теплообмена воздуха с поверхностью,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ , который может быть найден по зависимостям, приведенным, например, в

работах [13, 18, 19].

Из формулы (4) следует, что чем меньше число Био, тем больше термическое сопротивление слоя крепи. Например, число Био, равное одному, соответствует термическому сопротивлению равному  $1,0 \text{ м}^2/\text{ВтК}$ , а Био равное двум –  $0,5 \text{ м}^2/\text{ВтК}$ . По известному числу Био можно оперативно определить термическое сопротивление и выбрать подходящий материал дополнительного теплоизоляционного конструктивного слоя крепи камеры для ограничения зоны ее теплового влияния.

**Результаты и обсуждение.** По формулам (1)-(3) были проведены многовариантные расчеты, которые приведены в виде 3D графиков на рисунках 1 и 2. Анализ выполненных расчетов показал, что расчеты по всем трем формулам дают близкие результаты в достаточно широком диапазоне изменения исходных параметров. Причем, формула (3), которая не учитывает влияние числа Био на радиус теплового влияния, дает определенный расчетный запас. В целом же, очевидно, что чем больше значение числа Био, тем меньше его влияние на глубину зоны теплового влияния подземной камеры. Малые значения числа Био (до 5-6) характерны для камер, которые закреплены набрызгбетоном или имеют специальные теплозащитный покрытия [15]. На рис.1 приведен 3D график расчета зоны теплового влияния закрепленных набрызгбетоном камер и камер с теплоизоляцией.

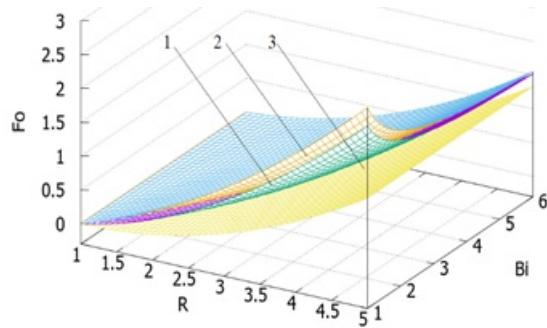


Рис.1. Изменение радиуса теплового влияния закрепленной подземной камеры в зависимости от критерия Био и Фурье:

1 – расчет по формуле (1); 2 – расчет по формуле (2); 3 – расчет по формуле (3).

Как видно из графиков, представленных на рисунке, для малых периодов эксплуатации камеры, все три формулы дают приблизительно одинаковые значения искомого параметра. Однако область этого не очень велика и резко уменьшается при увеличении эксплуатационного периода. Причем, чем меньше значение критерия Био (больше термическое сопротивление теплозащитного слоя), тем это расхождение больше. Для значений критерия Био больше трех формулы (1) и (2) дают близкие результаты. Формула (3) во всем рассмотренном диапазоне изменения чисел Био и Фурье дает завышенные результаты, однако степень их превышения и возможность отнести результаты в расчетный запас нуждается в дополнительной проверки для минимизации ошибки при выборе тех или иных технических решений при проектировании подземных сооружений. На рис.2 приведен график изменения глубины зоны теплового влияния одиночной незакрепленной камеры для различной длительности эксплуатационного периода.

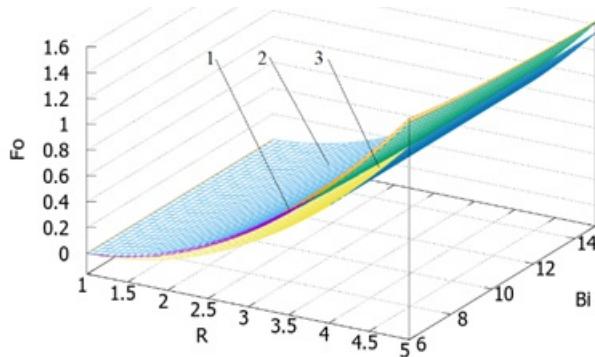


Рис.2. Изменение радиуса теплового влияния незакрепленной подземной камеры в зависимости от критерия Био и Фурье:

1 – расчет по формуле (1); 2 – расчет по формуле (2); 3 – расчет по формуле (3).

Как видно из графиков все три формулы дают приблизительно одинаковые значения безразмерного радиуса теплового влияния во всем рассмотренном диапазоне изменения критериев Био и Фурье. Сравнение графиков на рис. 1 и 2 показывает, что для незакрепленных камер вполне приемлемо определять зону теплового влияния камеры не учитывая ее зависимость от числа Био. То есть, не учитывать реальных условий теплообмена на поверхности горных пород (принимать равенство температуры воздуха и температуры поверхности пород в течение всего эксплуатационного периода). Для закрепленных камер и камер, имеющих специальное теплозащитное покрытие, необходимо использовать расчетные зависимости, учитывающие влияние числа Био на глубину зоны теплового влияния камеры.

**Заключение.** Проведено сравнение численных расчетов по определению зоны теплового влияния одиночной камеры подземного сооружения, выполненных по различным формулам, представленным в критериальной форме, как функции критериев Био и Фурье. Показано, что существует область изменения исходных данных, характерных для незакрепленных камер или при использовании штанговой крепи, когда допустимо считать, что глубина зоны теплового влияния не зависит от критерия Био. В то же время, для камер, закрепленных набрызгбетонной крепью или при использовании теплоизоляции на поверхности пород, такое допущение является в большинстве характерных случаев не допустимым или требует специальной дополнительной оценки возникающей ошибки. Результаты вариантов численных расчетов представлены в виде 3D графиков, что позволяет наглядно определить степень расхождения результатов расчетов по разным формулам. Статья имеет как прикладное так и методическое значение и может быть полезна как инженерам-проектировщикам различных подземных объектов в криолитозоне, так и аспирантам и студентам, обучающимся по направлениям 1.6. и 2.1. В дальнейшем следует провести дополнительные исследования для определения рациональной области использования предлагаемого методического подхода при определении зоны теплового влияния близко расположенных камер подземных сооружений. И, в особенности, при расчетах камер, расположенных в зоне взаимного теплового влияния, но эксплуатирующихся при разных тепловых режимах. Например, положительном и отрицательном, что характерно для эксплуатации камер в период чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера. Необходимо определить диапазон изменения исходных данных, при которых все формулы дают близкие результаты, когда отклонения расчетных значений не превышает допустимых в инженерной практике величин. Кроме того целесообразно провести подобные исследования для камер с резко изменяющимся тепловым режимом в течение короткого времени при наличии зависимости теплофизических свойств пород от температуры и

фазовых переходов влаги.

Работа выполнена по государственному заданию по теме: «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» (№ 122011800062-5).

## Библиография

1. Аренс В.Ж., Дмитриев А.П., Дядькин Ю.Д. и др. Термофизические аспекты освоения ресурсов недр. Л.: Недра, 1988. 344 с.
2. Кубаев В.А., Кузьмин Г.П. Подземное криохранилище семян растений на вечной мерзлоте //Геология, география и глобальная энергия. 2018. № 4. С. 150-155.
3. Кузьмин Г.П. Подземные сооружения в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 2002. 176 с.
4. Шац М.М. Сохранение биоразнообразия культурных растений в криохранилищах, расположенных в условиях вечной мерзлоты//Использование и охрана природных ресурсов в России. 2018. №1. С. 41-48.
5. Рекомендации по строительству, реконструкции и эксплуатации подземных холодильников Якутской АССР. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1982. 50 с.
6. Шувалов Ю.В., Галкин А.Ф. Теория и практика оптимального управления тепловым режимом подземных сооружений криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 8. С. 365-370.
7. Галкин А. Ф. Оценка энергетической эффективности подземных камер складов и холодильников// Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 4 С. 14-16. DOI: 10.18635/2071-2219-2019-4-14-16
8. Галкин А.Ф. Эффективность применения теплоизоляции в подземных сооружениях криолитозоны// Энергобезопасность и энергосбережение 2021. № 4. С. 18-21. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-4-18-21.
9. Плотникова Ю.А., Майбенко Н.И., Мартынов А.А. Теплоизоляция стенок горных выработок как способ регулирования тепловых условий в глубоких шахтах // Научные труды КубГТУ. 2019. № 3. С.421-430.
10. Сучков А.Н., Шведик П.П. Технология изоляции стенок подземных выработок//Уголь Украины. 2000. №1. С. 20-22.
11. Аминов В. Н. .Термоизоляция подземного пространства при отработке подкарьерных запасов в условиях длительного действия низких отрицательных температур. Петрозаводск : Verso. 2013. 51 с.
12. Скуба В. Н. Исследование устойчивости горных выработок в условиях многолетней мерзлоты. Новосибирск: Наука, 1974. 118 с.
13. Дядькин Ю.Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. М.: «Недра», 1968. 256с.
14. Воронов Е. Т., Бондарь И. А. Влияние температурного фактора на безопасность и эффективность ведения подземных горных работ в криолитозоне // Вестник ЧитГУ. 2010. № 5 (62). С. 85-93.
15. Галкин А. Ф. Расчет параметров теплозащитных покрытий подземных сооружений криолитозоны // «Известия ВУЗов. Горный журнал». 2008. № 6. С. 81-89.
16. Галкин А. Ф., Курта И. В. Влияние температуры на глубину оттаивания мерзлых пород. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 2. С. 82-91. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91.
17. Галкин А. Ф. Расчет критерия Фурье при прогнозе теплового режима талых и

- мерзлых дисперсных пород// Арктика и Антарктика, 2022, №3. С.1-10. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.3.38555 URL: [https://e-notabene.ru/arctic/article\\_38555.html](https://e-notabene.ru/arctic/article_38555.html)
18. Щербань А.Н., Кремнев О.А., Журавленко В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт. М.: Недра, 1977. 359 с.
19. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). М.: Высшая школа. 1982. 415 с.

## Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, особенности изучения и определение зоны теплового влияния одиночной камеры подземного сооружения в зависимости от вида используемого крепления (наличие теплозащитного слоя) и длительности эксплуатационного периода, с использованием различных расчетных формул.

Методология исследования исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании методов математического моделирования с использованием методов статистики и методологией, которая основана на использовании безразмерных параметров искомых величин.

Актуальность затронутой темы мониторинге безусловна и состоит в получении информации об актуальных процессах изменения подземного пространства криолитозоны с древних до настоящих времен широко используемого в хозяйственной деятельности человека в основном в качестве подземных хранилищ и холодильников.

Исследования автора статьи помогают понять механизм теплообмена на изменение погодно-климатических условий.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований сделает сравнение численных расчетов по определению зоны теплового влияния одиночной камеры подземного сооружения, выполненных по различным формулам, переданным в критериальной форме, как функции критериев Био и Фурье. Показано, что существует область изменения исходных данных, характерных для незакрепленных камер или при использовании штанговой крепи, когда допустимо считать, что глубина зоны теплового влияния не зависит от критерия Био. В то же время, для камер, закрепленных набрызгбетонной крепью или при использовании теплоизоляции на поверхности пород, такое допущение является в большинстве характерных случаев не допустимым или требует специальной дополнительной оценки возникающей ошибки. Результаты вариантов численных расчетов представлены в виде 3D графиков, что позволяет наглядно определить степень расхождения результатов расчетов по разным формулам. Полученные результаты является важным дополнением в развитии геоэкологии.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс использование различных формул для определения степени влияния источников тепла для камер различного типа на межзлотные грунты. Таблицы и графики иллюстративны, хотя, на наш взгляд, следовало бы обозначить дополнительные условия применение каждой из расчетных формул в зависимости от конфигурации хранилищ, которая определяет степень контакта с окружающими мерзлотными грунтами, объемами хранения и динамикой изменения исходных температур, теплопроводностью и теплоемкостью

закладываемых объектов на хранение и прочее. Весьма интересного для моделирования является и наличие обратной связи при теплообмене между замороженными продуктами хранения и окружающей средой по сезонам года.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволяющие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.