

нефтяных шахтах, возникает задача повышения пожарной безопасности. Законным механизмом повышения пожарной безопасности является разработка обоснований безопасности с дополнительными требованиями пожарной безопасности, направленными на исключение рисков повторения данных аварий со смертельными случаями [5].

### Заключение

Каждое горное предприятие, имеющее многолетний опыт эксплуатации, должно развиваться с учетом минимизации рисков возникновения инцидентов и аварий. Тщательный анализ произошедших аварий, проводимый проектными проектными организациями, и дальнейшая модернизация шахт, направленная на повышение промышленной безопасности, позволит сохранить человеческие жизни.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коноплев Ю.П., Буслаев В.Ф., Ягубов З.Х., Цхадая Н.Д. Термошахтная разработка нефтяных месторождений. – М.: Недра, 2006. — 288 с.: ил.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности»: утв. 15.12.2020, № 534). – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/573230594?marker=6520IM> (Дата обращения: 20.10.2020).
3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573156117>. (Дата обращения 20.03.2021).
4. Порядок проведения технического расследования причин аварий, инцидентов и случаев утраты взрывчатых материалов промышленного назначения»: утв. приказом Фед. службы по экологич., технологич. и атомному надзору от 08.12.2020, № 503. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573191697>. (Дата обращения 20.03.2021).
5. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта». Вып. 73: утв. 15.07.2013, № 306. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 13 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03).

УДК 622.253.3

DOI:10.7242/echo.2021.1.26

## НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

М.А. Семин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье проведен анализ возможных погрешностей аналитических формул для расчета внешней нагрузки на ледопородное ограждение и его толщины, способной выдержать расчетную нагрузку. На основании выявленных погрешностей предложены направления совершенствования методов статического расчета ледопородных ограждений шахтных стволов. Выделены физические процессы и факторы, существенным образом влияющие на напряженно-деформированное состояния замороженного породного массива и неучтенные ранее в существующих методах расчета толщины ледопородного ограждения.

**Ключевые слова:** ледопородное ограждение, статический расчет, напряженно-деформированное состояние.

## Введение

Строительство шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях [1] осуществляется с применением специальных способов, среди которых наиболее распространенным на сегодня является способ искусственного замораживания грунтов и пород. Суть метода заключается в формировании ледопородного ограждения (ЛПО) вокруг строящейся горной выработки для недопущения проникания в нее подземных вод, а также для укрепления боковых стенок горной выработки и минимизации их деформаций до возведения постоянной бетонной крепи.

Расчеты ЛПО стволов шахт сводятся к статическим, определяющим необходимую толщину ЛПО из условий прочности, устойчивости или по предельно допустимым деформациям, и к теплотехническим, на основании которых определяются холодопроизводительность замораживающей установки, режим и время замораживания, температурное поле слоев горных пород [2, 3].

В настоящей статье речь пойдет о статическом расчете ЛПО, который обычно производится по двум предельно допустимым состояниям – предельным напряжениям (расчет на прочность) и предельным деформациям (расчет на ползучесть) [3]. Исходные данные для проведения статического расчета – это физико-механические и гидрогеологические свойства пород в интервале замораживания, проектные параметры строительства ствола.

Физико-механические свойства пород, определяемые при естественной (или фиксированной положительной) температуре, используются при расчете давления (нагрузки) на внешнюю стенку ЛПО. Среди таких параметров [1, 4]:

- плотность породы, плотность твердых частиц (скелета) породы;
- пористость породы;
- естественное весовое влагосодержание породы;
- условно-мгновенные значения структурного сцепления и угла внутреннего трения.

Давление на внешнюю стенку ЛПО рассчитывается также с использованием следующих гидрогеологических свойств пород:

- абсолютные отметки кровли и подошвы водоносных горизонтов и водоупоров;
- статические уровни подземных вод в гидрогеологических скважинах.

Физико-механические свойства пород, определяемые при отрицательной температуре (как правило, не выше  $-4^{\circ}\text{C}$ ), необходимы для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС), представлены ниже:

- условно-мгновенное значение предела прочности на одноосное сжатие;
- модуль линейной деформации, коэффициент Пуассона, условно-мгновенные значения структурного сцепления и угла внутреннего трения;
- предельно-длительное значение предела прочности на одноосное сжатие;
- реологические параметры: коэффициент нелинейной деформации, коэффициент упрочнения замороженных пород (коэффициент нелинейности по напряжениям), коэффициент нелинейности по времени.

Помимо этого для расчета НДС замораживаемого породного массива необходимы проектные параметры строительства ствола:

- радиус ствола в проходке;
- предлагаемая к проекту высота участка ЛПО, не подкрепленного крепью (высота заходки);
- допускаемое по технологическим соображениям радиальное смещение внутренней стенки ЛПО.

С учетом этих параметров давление на внешнюю стенку ЛПО и выдерживающая его толщина ЛПО рассчитывается по аналитическим зависимостям. Аналитические зависимости получены в результате приближенного решения задач о НДС в незамороженной и/или замороженной областях породного массива. В настоящей статье проведен

анализ возможных погрешностей в результате принятия тех или иных упрощений при выводе аналитических формул для расчета нагрузки на ЛПО и толщины ЛПО; предложены пути повышения точности методов статического расчета ЛПО.

### Расчет давления на ледопородное ограждение

Горизонтальное давление  $P_n$  (Па), действующее на ЛПО на глубине, соответствующей подошве слоя №  $n$ , складывается из горизонтального давления  $P_n^{(e)}$ , обусловленного весом вышележащих слоев пород, и гидростатического давления  $P_n^{(r)}$  [1]:

$$P_n = P_n^{(e)} + P_n^{(r)}, \quad (1)$$

$$P_n^{(e)} = \left( \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \right) K_n - 2C_n \sqrt{K_n}, \quad (2)$$

$$K_n = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (3)$$

$$P_n^{(r)} = H_e \gamma_v, \quad (4)$$

где индекс  $i$  – порядковый номер слоя породы, начиная с земной поверхности и до расчетного слоя №  $n$ , то есть  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $\gamma_i$  – удельный вес породы в  $i$ -ом слое, Н/м<sup>3</sup>;  $C_n$  – коэффициент сцепления слоя породы при естественной температуре, Па;  $\varphi$  – угол внутреннего трения слоя породы  $n$  при естественной температуре;  $h_i$  – мощность  $i$ -го слоя породы, м;  $K_n$  – коэффициент активного давления слоя породы №  $n$ ;  $\gamma_v$  – удельный вес воды, принимается равным 10000 Н/м<sup>3</sup>;  $H_e$  – естественный напор для данного водоносного горизонта, определяемый по результатам гидрогеологических исследований, м.

В рамках метода (1) – (4) к расчету бокового давления на ЛПО предполагается, что НДС в незамороженном породном массиве, окружающем сформированное ЛПО, существенно отличается от естественного НДС породного массива до начала искусственного замораживания и проходки горной выработки. В действительности же НДС как незамороженного, так и замороженного массива претерпевают изменения ввиду действия ряда физических процессов:

- расширение воды при ее замерзании и выпирание незамороженной породы на границе ЛПО [5];
- радиальное смещение ЛПО по направлению к центру ствола при проходке горной выработки [6];
- пластическое деформирование незамороженных пород вблизи границ ЛПО [6, 7].

Здесь не указан еще один фактор – сжатие сухого скелета породы при понижении температуры, поскольку для влажных пород данный фактор оказывает на 1-2 порядка меньшее влияние, чем расширение замерзающей воды и не способен скомпенсировать этот эффект.

По оценкам, сделанным в наших исследованиях<sup>1</sup>, метод (1) – (4) дает завышенную оценку бокового давления на внешнюю стенку ЛПО по сравнению с расчетом, проведенным с учетом указанных выше физических процессов. Метод (1) – (4) позволяет корректно оценить боковое давление только при малом радиальном смещении неподкрепленного участка ЛПО к центру строящейся выработки. Это имеет место для породных слоев, которые в замороженном состоянии имеют высокие деформационно-прочностные характеристики и проявляют слабое реологическое течение при длительном нагружении.

<sup>1</sup> Отчет о НИР. Расчет параметров ледопородных ограждений шахтных стволов с учетом морозного пучения и консолидации пород, неоднородного распределения физико-механических и прочностных свойств пород. 2021 г. Пермь. 99 с.

Также важно отметить, что формула (2) имеет ограниченную применимость: для пород с достаточно высокими структурным сцеплением и углом внутреннего трения второе слагаемое справа может превышать первое слагаемое, в результате чего расчетная величина горизонтального давления пород будет отрицательной. Эта особенность формулы, по-видимому, учтена в [8], поскольку в данном документе формула (2) рекомендуется к применению конструкций, которые испытывают достаточно сильные перемещения в результате воздействия внешней нагрузки. В то время как для малых перемещений вводится формула из линейной теории упругости:

$$P_n^{(e)} = \left( \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \right) \frac{\nu}{1 - \nu}, \quad (5)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона незамороженной породы.

Метод (1) – (5) в целом может быть применим в случае, если рассчитываемая нагрузка прикладывается к внешней границе не ЛПО, а незамороженного массива, окружающего ЛПО и явно рассматриваемого в процессе расчета толщины ЛПО [6].

### Расчет толщины ледопородного ограждения

Согласно [2], в настоящее время наиболее распространенными формулами для расчета толщины ЛПО по предельным напряжениям (расчет на прочность) и предельным деформациям (расчет на ползучесть) являются формулы С.С. Вялова [3]:

$$E_{\text{пн}} = R \left\{ \left[ 1 + \frac{P(\Lambda_f - 1)}{\bar{\Lambda}_f} \right]^{\Lambda_f - 1} - 1 \right\}, \quad (6)$$

$$E_{\text{пд}} = R \left[ \left( 1 + \frac{(1 - m) \cdot P \cdot h_3^{1+m}}{A(t; \theta) \cdot \Delta^m \cdot R} \right)^{\frac{1}{1-m}} - 1 \right], \quad (7)$$

где  $R$  – радиус ствола в проходке, м;  $P$  – горизонтальное давление (1), действующее на ЛПО, Па;  $\Lambda_f$ ,  $\bar{\Lambda}_f$  – коэффициенты в законе Кулона-Мора, записанного в главных напряжениях;  $m$  – коэффициент упрочения замороженных пород (коэффициент нелинейности по напряжениям);  $h_3$  – высота участка ЛПО не подкрепленного крепью (высота заходки), м;  $\Delta$  – допускаемое по технологическим соображениям радиальное смещение внутренней стенки ЛПО, м;  $A$  – предельно-длительное значение деформации, которое определяется по формуле:

$$A(t; \theta) = \xi \left( \frac{t}{t_0} \right)^{-\alpha}, \quad (8)$$

где  $\xi$  – коэффициент нелинейной деформации замороженных пород, Па;  $\alpha$  – коэффициент нелинейности по времени;  $\theta$  – температура образца породы, при которой производились испытания, °С;  $t$  – время, в течение которого выполняется закрепление стенок ствола в интервале заходки, час;  $t_0=1$  час применяется для обезразмеривания времени  $t$ .

Формула (7) используется для расчета толщины ЛПО на ползучесть с учетом конечной высоты неподкрепленного участка. Формула (6) используется для расчета толщины ЛПО на прочность в предположении неподкрепленного участка ЛПО бесконечной высоты, что является существенным огрублением при решении задачи. Помимо этого существенными упрощениями, которые имеют место для всех формул С.С. Вялова, являются указанные выше неучет изменения НДС в областях замороженного и незамороженного массивов из-за расширения поровой воды при ее замерзании, радиальное смещение ЛПО при проходке ствола. Однако данные эффекты могут быть заранее учтены в величине рассчитываемой нагрузки на внешнюю стенку ЛПО – в этом случае повторный их учет в формулах расчета толщины ЛПО не нужен.

Помимо формулы (6) в монографии [3] также предложена формула для расчета толщины ЛПО по предельным напряжениям для конечной высоты неподкрепленного участка:

$$E = \frac{\sqrt{3} \cdot P \cdot h}{2 \cdot \sigma_{\text{дл}}}, \quad (9)$$

где  $\sigma_{\text{дл}}$  – предельно-длительное значение предела прочности на одноосное сжатие, определенное для расчетного времени  $t$ , °С.

Несмотря на свою простоту и меньшее количество параметров, данная формула также дает высокую погрешность: в [2, 9] было показано, что рассчитанные по формуле (9) толщины ЛПО могут быть в несколько раз выше, чем толщины, вычисленные на трехмерной модели. Это связано с использованием в ней критерия Мизеса для определения предельного напряженного состояния, в то время как для горных пород более корректно использовать критерий Кулона-Мора.

В [10] проведено исследование влияния неучтенных в (6) – (9) процессов морозного пучения и консолидации пород на НДС в ЛПО. Показано, что данные процессы приводят к объемному расширению пород в замороженной зоне и оказывают большое влияние на распределение напряжений во всем слое. Так, для исследованного слоя алеврита, подверженного морозному пучению, получено, что абсолютная величина среднего напряжения на внешней стороне ЛПО на 49% больше, чем в расчете без учета криогенных течений и морозного пучения. Величина радиального смещения внутренней стенки ЛПО на этапе проходки и крепления выработки при учете процессов морозного пучения и консолидации также оказывается существенно выше (в 2 раза для слоя алеврита). Это указывает на необходимость учета данных физических факторов в формулах толщины ЛПО как по прочности, так и по ползучести.

В исследованиях [7, 9], проведенных совместно с автором этой статьи, уточнены способы задания граничных условий защемления на торцах ЛПО, использованы корректные критерии прочности замораживаемых пород и видоизмененный критерии потери несущей способности ледопородного ограждения.

Еще один важный вопрос – это зависимость толщины ЛПО от неоднородности прочностных свойств по объему ЛПО, вызванной неоднородностью температур. В литературе данный вопрос не исследовался, в то время как он является очень важным для определения эффективных расчетных формул толщин ЛПО. Решение данного вопроса требует существенно большего количества исходных данных (температурные зависимости физико-механических и прочностных свойств пород) для проведения статического расчета. Также при решении данного вопроса существует неоднозначность в определении требуемой толщины ЛПО, которая, как и поле температур, будет зависеть от режима работы замораживающей станции. Представляется целесообразным проводить статический расчет толщины ЛПО с учетом неоднородности его прочностных свойств на стадии пассивного замораживания как стадии с наиболее высокими температурами ЛПО [11, 12].

### Заключение

Проведенный в статье анализ позволяет выделить два основных пути проведения статического расчета ЛПО на прочность и ползучесть.

1. При решении задачи о НДС в замораживаемом массиве и расчете толщины ЛПО необходимо явно рассматривать область незамороженного массива такой протяженности, которой будет достаточно для того, чтобы на внешней границе расчетной области НДС было близко к естественному. При этом определять внешнюю нагрузку на охлажденный и замороженный породный массив в данном случае можно исходя из предположения о естественном НДС породного массива до начала искусственного замораживания по формулам (1) – (5).

2. При решении задачи о НДС в замораживаемом массиве и расчете толщины ЛПО можно явно не рассматривать область незамороженного массива. При этом необходимо определять внешнюю нагрузку на охлажденный и замороженный породный массив (внешнюю границу ЛПО) исходя из изменяющегося НДС в незамороженном массиве в результате расширения воды, радиальных смещений ЛПО, пластического деформирования незамороженной породы и прочих значимых физических процессов.

Для первого пути необходимо изменить расчетные формулы для толщин ЛПО по критериям прочности и ползучести. Для второго пути необходимо изменить расчетные формулы для величины внешней нагрузки на ЛПО.

При этом в статье показано, что в существующих аналитических формулах по расчету толщины ЛПО не учитывается ряд других важных физических факторов, существенным образом влияющих на НДС в замороженном породном массиве (неоднородность прочностных свойств в объеме ЛПО, морозное пучение, криогенные течения, радиальное смещение ЛПО к центру строящегося ствола и пр.). Это означает, что корректировка соответствующих формул для толщины ЛПО важна безотносительно выбранного пути. Поэтому целесообразно двигаться по первому пути и направить дальнейшие исследования на корректировку аналитических формул по расчету толщин ЛПО на предмет приближенного учета данных факторов. Частично данные вопросы были решены в работах [7, 9, 10], в которых предложены корректировки формул С.С. Вялова на предмет корректного учета граничных условий защемления на торцах ЛПО, обоснованных критериев прочности замораживаемых пород и критериев потери несущей способности.

Следует отметить, что совершенствование методов расчета ЛПО в ряде случаев потребует определения дополнительных исходных данных, например коэффициенты пучинистости, кривые пучения, температурные зависимости прочностных свойств замораживаемых пород, модули линейной деформации, коэффициенты Пуассона, параметры длительной прочности для незамороженных пород и пр. Экспериментальное определение этих параметров может быть сопряжено с существенными дополнительными затратами, а потому в данном случае очень важно определить минимальный перечень дополнительных параметров, достаточный для приближенной оценки влияния того или иного фактора на значение требуемой толщины ЛПО для слоев пород различного типа.

*Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда  
в рамках проекта № 17-11-01204.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по расчету параметров, контролю и управлению искусственным замораживанием горных пород при строительстве шахтных стволов на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий». – Пермь; Солигорск, 2019. – 65 с.
2. Левин Л. Ю., Семин М. А., Плехов О. А. Сравнительный анализ существующих методов расчета толщины ледопородного ограждения строящихся шахтных столов // Вестн. ПНИПУ: Строительство и Архитектура. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 93-103. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.09.
3. Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов. – М.: Стройиздат, 2000. – 463 с.
4. ВСН 189-78. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей / Минтрансстрой: Утв. Гл. техн. упр. 10.05.78: [Введ. В действие 01.10.78]. – М., 1978. – 115 с.
5. Хакимов Х.Р. Вопросы теории и практики искусственного замораживания грунтов. – М.: Изд-во АН СССР, 1957.–
6. Yang W.-H., Du Z.-B., Yang Z.-J., Bo D.-L. Plastic design theory of frozen soil wall based on interaction between frozen soil wall and surrounding rock // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. – 2013. – V. 35, № 10. – P. 1857-1862.

7. Kostina A., Zhelnin M., Plekhov O., Panteleev I., Levin L., Semin M. Applicability of Vyalov's equations to ice wall strength estimation // *Frattura ed integrita strutturale*. – 2020. – V. 14, № 53. – P. 394-405. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.53.30.
8. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* (с Изменениями № 1, 2, 3). Дата введения 2017-07-01. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (Дата обращения 15.04.2021).
9. Zhelnin M., Kostina A., Plekhov O., Panteleev I., Levin L. Numerical analysis of application limits of Vyalov's formula for an ice-soil wall thickness // *Frattura ed Integrita Strutturale*. – 2019. – V. 13, № 49. – P. 156-166. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.49.17.
10. Желнин М.С., Костина А.А., Прохоров А.Е., Плехов О.А., Левин Л.Ю. Численное моделирование искусственного замораживания грунтовых слоев для проходки шахтного ствола. – Текст электронный // XXII Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл. / ПФИЦ УрО РАН. – Пермь, 2021. – С. 132. – URL: <https://conf.icmm.ru/event/2/attachments/2/47/Книга%20тезисов%20с%20обложкой.pdf>.
11. Семин М.А., Богомягков А.В., Левин Л.Ю. Теоретический анализ динамики ледопородного ограждения при переходе на пассивный режим замораживания // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 243. – С. 319-328. – DOI: 10.31897/PMI.2020.3.319.
12. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Контроль и прогноз формирования ледопородного ограждения с использованием оптоволоконных технологий // *Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН*. – Пермь, 2016. – С. 236-238.

УДК 622.8

DOI:10.7242/echo.2021.1.27

## **ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН ДЛЯ ЭВАКУАЦИИ ПЕРСОНАЛА ПРИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ В НЕФТЯНЫХ ШАХТАХ**

Д.В. Шептунов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** В статье определена необходимость использования аварийно-спасательных скважин в нефтяных шахтах, приведены результаты анализа норм промышленной безопасности РФ, а также обзор отечественного и мирового опыта эвакуации людей при авариях на шахтах.

**Ключевые слова:** аварийно-спасательная скважина, система эвакуационного выхода.

### **Введение**

Одной из основных задач действующих норм промышленной безопасности является сохранение жизни и здоровья работников на опасных производственных объектах (далее — ОПО). Не являются исключением и требования к безопасности на предприятиях по добычи тяжелой нефти шахтным способом НШПП «Яреганефть» ООО «ЛУКОЙЛ-Коми».

### **Требования норм промышленной безопасности**

Главным документом, направленным на обеспечение промышленной безопасности, предупреждение аварий и инцидентов на ОПО нефтегазодобывающих производств, на обеспечение готовности организаций, эксплуатирующих нефтегазодобывающие ОПО, к локализации и ликвидации последствий аварий, является Приказ Ростехнадзора от 15.12.2020 N 534 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности “Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности”» (далее – ФНиП). ФНиП уделяют особое внимание вопросам организации эвакуации персонала шахты как из отдельных выработок, так и с каждого горизонта, а также из шахты в целом на поверхность.

Несмотря на жёсткие требования, предъявляемые к организации процесса эвакуации работников, на шахтах периодически происходят несчастные случаи, связанные не