© И.С. Вакуленко, П.В. Николаев, 2015

УДК 622.272:622.238

И.С. Вакуленко, П.В. Николаев

АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СПОСОБА ИСКУССТВЕННОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ПОДЗЕМНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Приведен анализ развития способа искусственного замораживания горных пород при строительстве подземных сооружений, рассмотрены результаты экспериментальных и теоретических исследований, связанных с определением времени замораживания. Показано, что актуальность развития и совершенствования способов искусственного замораживания горных пород резко возросла в связи с разработкой инновационных технических решений освоения подземного пространства мегаполисов. Обоснована тенденция развития численных методов моделирования для процесса замораживания пород, обозначена возможность производить математическое моделирование для каждого конкретного объекта. Предложены основные направления для дальнейшего совершенствования способа искусственного замораживания пород.

Ключевые слова: замораживание горных пород, замораживающая станция, ледопородные ограждения, замораживающие колонки.

Способ искусственного замораживания горных пород получил широкое распространение в подземном строительстве. Его применяют при возведении подземных сооружений в слабых неустойчивых водоносных породах. Также он применяется и в устойчивых, но сильно трещиноватых породах с большой водообильностью.

Для охлаждения горных пород используют холодильные установки с системой погружаемых в породу труб (замораживающих колонок), по которым циркулирует хладоноситель, с температурой -20÷-40 °С (рассольный способ замораживания), или хладагент, который непосредственно испаряется в замораживающей колонке при температуре от -35 до -196 °С (безрассольный способ замораживания).

Данный способ существует уже более 130 лет, однако, за это время он претерпел многие изменения. Появилась четко сформированная научная база, описывающая все аспекты данного процесса.

Создано мощное оборудование, высокопроизводительные замораживающие станции, изучены нестационарные процессы теплообмена в массиве горных пород и замораживающих колонках, разработаны инженерные методы расчета проектирования ледопородных ограждений и холодильного оборудования. К настоящему времени с его помощью в различных городах Советского Союза и России построено 132 наклонных эскалаторных тоннеля протяженностью более 8 км, 162 ствола, 53 котлована и более 6 км станционных и перегонных тоннелей метрополитенов, около 12 км коллекторных тоннелей, осуществлено замораживание в условиях залегания водоносных пород на глубине до 820 м, при температуре среды до +35 °С, наличии фильтрующих пород и минерализации подземных вод. Большое распространение способ искусственного замораживания горных пород получил в Польше, Великобритании, Франции, Нидерландах.

Исследование истории развития научных основ и технологических особенностей данного способа позволяет выявить его недостатки, проследить пути по которым происходило их ре-

шение, и в итоге более точно оценить направление дальнейших исследований в этой области.

Применяемый в настоящее время способ искусственного замораживания пород ведет свое начало от способа естественного замораживания, получившего в мировой технической литературе название сибирского способа (procede sibirienne). Данное название встречается в работах немецких ученых М. Шмидта и Р. Хельмахера относящимся к 1895–1896 гг.

В своем отчете о путешествии по ненецкой тундре: «Путешествие к северо-востоку Европейской России через тундры самоедов, предпринятое по высочайшему повелению в 1837 г.» А. Шренк рассказывает, как жители Пустоозерского городка проходят колодцы для питьевой воды в мерзлой породе при помощи пожогов.

Понимание физических основ теплопередачи в горных породах и изобретательность сибирских проходчиков позволяли им вести проходку в наиболее сложных случаях залегания золотых россыпей под руслами рек. Поздно осенью во время мелководья в том месте реки, где предполагали пройти шурф, погружали в реку деревянный сруб размерами в свету 2 х 2 сажени.

В сруб и вокруг него набрасывали камни для лучшей передачи температуры воздуха донным породам. При этом избегали примеси песка земли и глины. Замерзший песок играет роль цемента и затрудняет последующую выемку камня, а земля и глина ухудшают промораживание каменной наброски.

Когда зимой река покрывалась льдом, камни вынимали из сруба, образуя первоначальное углубление. После выемки первого слоя породы работу на некоторое время приостанавливали, чтобы дать возможность промерзнуть следующему слою, затем шурф углубляли на 10–15 см, после чего цикл повторялся. Для облегчения выемки породы применяли пожоги.

Замораживание пород холодным воздухом применялось не только в Сибири. В 1851 г. опубликована работа К. Шлиппе «О приисках каменного угля и серного колчедана в Калужской губернии», в которой упоминается об использовании естественного замораживания для производства горных работ в неустойчивых породах.

Вопрос о применении замораживания при сооружении стволов шахт за рубежом, согласно литературным источникам, возник в 1852 г. Француз Мишо, старший рабочий на руднике «Анзин», обратил внимание на то, что суровой зимой 1852 г. крепь ствола шахты «Бонапарт», пропускавшая обычно довольно значительное количество воды, стала совершенно водонепроницаемой.

Известив об этом руководство предприятия, Мишо обратил их внимание на то, что если бы можно было искусственно создать достаточно низкую температуру для закрепления некоторого участка водоносных и неустойчивых пород, покрывающих каменноугольные месторождения Северного бассейна Франции, то проходка стволов шахт здесь стала бы легче и обходилась бы дешевле. Но в то время еще не существовало холодильных машин, и идея Мишо не получила практического осуществления.

Немецкому инженеру Петчу в 1880 г. удалось при производстве лабораторного опыта заморозить за 8 дней массу ила объемом 4 м^3 посредством циркуляции по трубкам, заложенным в этот ил, соляного раствора, охлажденного до температуры минус 19 °С.

В 1883 г. способ Петча был запатентован и разработан настолько, что приобрел промышленное значение. Петчу удалось при его помощи пересечь слой плывуна мощностью 5,5 м на руднике «Арчибальд» в Ашеребене (Магдебургский округ).

Способ искусственного замораживания горных пород состоит в том, что в водоносных породах вокруг запроектированного сооружения образуется временная ледопородная стена, защищающая выработку от проникновения воды на время проходческих работ. Образование ледопородной стены достигается тем, что по контуру намеченного к проходке ствола бурят скважины, по которым циркулирует охлажденный до отрицательной температуры рассол. Охлаждение жидкости происходит на поверхности с помощью холодильных машин.

В России до Великой Октябрьской социалистической революции не было ни одного случая применения способа замораживания в его современном виде. Зато после революции работы по замораживанию пород приобрели огромное развитие.

Способ был впервые применен в 1928 г. для проходки ствола № 2 Соликамского калийного рудника. Одновременно с этим стволом там же проходился ствол № 1 с применением способа цементации водоносных пород. Опыт проходки этих стволов должен был показать, какому из способов следует отдать предпочтение при проходке других стволов шахт. Все преимущества оказались на стороне способа замораживания и при последующих работах стволы Березниковского калийного рудника проходили только с применением способа замораживания.

В течение длительного времени способ замораживания пород при помощи рассола был единственным. В 1938 г. был предложен способ безрассольного замораживания – непосредственным испарением хладагента в замораживающих колонках.

С ростом масштаба и глубин применения способа замораживания развивались научно-исследовательские работы в этой области, большая часть которых проведена в Лаборатории специальных способов проходки горных выработок и водопонижения ИГД им. А.А. Скочинского, большой вклад в развитие способа искусственного замораживания горных пород внесли работы, выполненные в МГГУ.

Техника способа замораживания усложнялась и совершенствовалась по мере увеличения глубины замораживания, которая достигла на калийной шахте в Канаде 914 м. Работы по строительству данного объекта производились в период с 1954 по 1959 гг. В Англии, на одной из угольных шахт, в конце 1960-х гг., производилось замораживание на глубине от 550 до 975 м. В отечественной практике, максимальная глубина замораживания составляет 620 м, выполненная при строительстве Яковлевского рудника КМА, в период с 1974 по 1987 гг.

Таким образом, к семидесятым годам XX в. способ искусственного замораживания горных пород сформировался с точки зрения технологи и производства работ. Был накоплен значительный опыт по проектированию и строительству, однако теоретические основы метода были развиты еще очень слабо, ввиду крайней сложности описываемых физических процессов.

После 1991 г. в развитии способа искусственного замораживания горных пород наметилось некоторое замедление, вызванное общим спадом производства, при котором столь дорогостоящий специальный способ, как искусственное замораживание пород, стал не востребованным. Однако, в последние годы наблюдается тенденция к восстановлению интереса к нему. Это обусловлено тем, что та часть из разведанных месторождений, на которых не требовалось применения специального способа строительства, уже разрабатывается, или разработана, другая же, обладает плохими горно-геологическими условиями.

Так же, к всплеску интереса к специальным способам строительства привело бурное развитие крупных городов. Строительство метрополитенов, коллекторов, подземных парковок зачастую происходит в неустойчивых водонасыщенных породах.

Одним из путей совершенствования данного способа строительства, является изменение конструкции замораживающей колонки. Предложенная Петчем в 1883 г., колонка из коаксиально расположенных труб, хотя и получила подавляющее распространение, имеет ряд недостатков, которые исследователи пытаются устранить по сей день. Так, в МГГУ производились работы по совершенствованию конструкции U-образных замораживающих колонок, в качестве замораживающих колонок предлагалось использовать две сваренные квадратные трубы.

Большое внимание, на современном этапе развития способа уделяется энергоэффективности. Так, можно выделить работу Р.А. Никитушкина в которой предпринимаются попытки снижения материальных и энергетических затрат при монтаже замораживающих колонок, за счет применения вибропогружения.

Параллельно с развитием способа Петча, исследователями предпринимались попытки создать другие возможные варианты способов замораживания горных пород. В результате появились безрассольные способы, в которых отсутствует промежуточный хладоноситель – рассол. А хладагент загружается непосредственно в замораживающую колонку. В качестве хладагента предлагалось использовать аммиак, жидкую углекислоту, жидкий азот, твердый диоксид углерода. Однако до настоящего времени, данные технологические схемы не нашли широкого применения.

Способ замораживания горных пород с использованием твердого диоксида углерода был впервые предложен в МГГУ. Данная технологическая схема показала свою эффективность при замораживании незначительных объемов пород, характерных для городского подземного строительства. Дальнейшие исследования, проводимые в Горном Университете, были направлены на расширение области применения данной технологии.

Анализ существующих способов замораживания, показал, что наиболее широкое применение получил рассольный способ замораживания пород. Остальные же применяются в ограниченных объемах, в основном, когда нет возможности применить рассольный способ либо в аварийных случаях при замораживании.

В настоящее время ведутся исследования новых перспективных способов искусственного замораживания, таких как замена хладоносителя с хлорида кальция на менее токсичные соединения, а также новые конструктивные решения для замораживающих колонок, позволяющие эффективнее использовать хладоноситель.

Основным параметром, определяющим экономическую целесообразность применения способа замораживания, является толщина ледопородных ограждений. Завышение или занижение толщины ледопородных ограждений ведет или к значительному увеличению объема замороженных горных пород, или к разрушению ледопородного ограждения и прорыву подземных вод. Как в первом, так и во втором случае это приводит к значительному увеличению стоимости и срока строительства подземного сооружения. Особенно важное значение приобретает вопрос определения толщины ограждения при освоении месторождений, залегающих на больших глубинах, где имеет место большой расход энергии при замораживании 1 м^3 ледопородного массива. На основании принятой толщины ледопородного ограждения осу-

ществляются все последующие теплотехнические и технологические расчеты процесса замораживания.

Определение толщины ледопородного ограждения с учетом указанных факторов является весьма сложной задачей, поэтому ее решение, учитывая инженерный характер и большой разброс значений исходных параметров, осуществляется приближенными методами.

Точность определения продолжительности замораживания в значительной степени зависит от надежности определения теплофизических свойств горных пород.

Следует иметь в виду, что стволы пересекают большое количество разнообразных горных пород с различными физико-химическими свойствами, которые порождают и исключительную изменчивость их теплофизических свойств. Эти свойства существенным образом зависят от таких параметров, как влажность (льдистость), температура, плотность. Все это в значительной степени затрудняет подготовку справочных материалов по теплофизическим свойствам замороженных горных пород. Трудность еще заключается и в том, что, в отличие от однородных сплошных твердых тел, горные породы являются многокомпонентными и многофазными физико-химическими системами. Они состоят из множества частиц различной формы и размеров или же пронизаны сложной системой пор и трещин, заполненных водой. Поровая влага имеет решающее значение, в формировании теплофизических свойств пород.

Горные породы в процессе их замораживания приобретают новые свойства, которые обусловливаются двумя основными факторами, сопровождающимися формированием криогенной текстуры и структуры мерзлых пород: перераспределением и переходом поровой влаги в лед.

К основным теплофизическим характеристикам замороженных пород, которые необходимы при расчете процесса искусственного замораживания, относятся: коэффициент теплопроводности, характеризующий способность горной породы проводить тепловую энергию под действием градиента температур, теплоемкость, характеризующая теплоаккумулятивные свойства среды, коэффициент температуропроводности, который определяет скорость изменения температурного поля среды.

Следует отметить, что данных о теплофизических свойствах горных пород, особенно замороженных, еще недостаточно. Это связано с трудностью получения в лабораторных условиях образцов пород в естественном состоянии и с ненарушенной структурой, а также с трудностями, возникающими при проведении самих опытов по определению теплофизических свойств породы, так как при их проведении трудно бывает выдержать определенный температурный режим.

Анализ проектирования процесса замораживания показывает, что надежность расчетных методов и в конечном счете успех замораживания в значительной степени зависит от того, насколько правильно и научно обоснованно будут определены такие параметры, как средняя температура ледопородного ограждения, удельный тепловой поток, которые, в свою очередь, функционально связаны с температурой стенки и с коэффициентом теплоотдачи в замораживающих колонках. Все эти параметры тесно взаимосвязаны как между собой, так и с прочностными и конструктивными параметрами ледопородного ограждения. Поэтому дальнейшее совершенствование способа замораживания невозможно без детального исследования основных теплотехнических параметров в их взаимоувязке.

Для исследования развития температурного поля во времени и пространстве необходимо комплексно решать задачу внутреннего и внешнего теплообмена, поскольку температура на наружной поверхности замораживающей колонки является граничным условием для двухмерной задачи теплообмена в определенном горизонтальном слое породы.

Существенное осложнение вносит в задачу рассредоточенность источников холода, а также различная температура в разных точках поперечного сечения ледопородного ограждения.

Наконец, следует учитывать то важное обстоятельство, что задача в тепловом отношении не является осесимметричной вследствие взаимовлияния замораживающих колонок, расположенных кольцом вокруг ствола. Асимметрия усугубляется отклонением замораживающих скважин от вертикали.

Несомненный приоритет здесь имеют советские ученые, в числе которых следует назвать Н.Г. Трупака, И.А. Чарного, Х.Р. Хакимова, И.Г. Портнова и др. Из зарубежных авторов аналитических методов известны Лебртон, Хейзе и Дрекопфа, Бике, Штендер.

Работа Н.Г. Трупака «Замораживание горных пород при проходке стволов шахт» 1954 г. стала фундаментом дальнейших теоретических исследований в области искусственного замораживания в России.

Попытки более полного учета динамики процесса были предприняты И.А. Чарным и Х.Р. Хакимовым. Для решения задачи применяется метод последовательной смены стационарных режимов, заключающийся в том, что распределение температур в зоне замороженных и охлажденных пород определяется логарифмическими функциями, удовлетворяющими уравнению установившейся теплопередачи, а зависимость от времени вводится параметрически через радиус промерзания. По методу Х.Р. Хакимова непосредственному решению поддается также только осесимметричная задача, поэтому расчет замораживания кольцом колонок проводится в два этапа: до соприкосновения отдельных ледопородных цилиндров, образующихся вокруг каждой колонки (без учета их взаимного влияния), и от момента смыкания до образования общего ограждения с заданной толщиной стенки, путем замены в расчетной схеме отдельных замораживающих колонок сплошным полым цилиндром, средний диаметр которого равен диаметру кольца колонок.

Расчетные формулы получаются громоздкими и малоудобными для вычислений. Во всех упомянутых решениях температура рассола считается постоянной во времени, что также далеко от практических условий замораживания.

При замораживании пород на большие глубины встает задача определения внутреннего теплообмена рассола в колонке на заданном горизонте.

Первое по времени решение этой задачи дано Лебретоном в 1885 г. Далее Бике в 1933 г. уточняет решение Лебретона введением в расчетные формулы коэффициента теплоотдачи от поверхности труб к рассолу и с учетом возможной теплоизоляции питающих труб.

Более строгое решение задачи получено Хейзе и Дрекопфом, опубликованное в 1922 г. В их методике распределение температур определяется решением системы двух дифференциальных уравнений первого порядка при условии линейного распределения температуры внешней среды по глубине.

Аналитическим методам свойственны существенные недостатки, приводящие к занижению расчетной прочности ледопородного ограждения и к увеличению проектных сроков замораживания, причем чем больше

глубина замораживания и чем выше естественная температура пород, тем более чувствительной становится погрешность аналитических методов.

Сложность и недостаточная точность аналитических решений заставила ученых прибегнуть к методам физического моделирования. Среди таких методов в 1960–70-х гг. некоторое распространение получил метод гидравлических аналогий проф. В.С. Лукьянова, разработанный для данной цели в Институте горного дела им. А.А. Скочинского. Метод гидравлических аналогий проф. В.С. Лукьянова основан на математическом подобии процесса распространения тепла в горных породах и процесса перетекания жидкости в системе сообщающихся сосудов.

Однако данные методы моделирования не нашли большого распространения, в виду стремительного роста численных методов моделирования, связанного с появлением высокоэффективных вычислительных машин.

В 1970–80-е гг. численные методы моделирования процесса замораживания производились для решения узких задач, в виду того, что вычисления были долгими и дорогостоящими. На основе упрощенных математических моделей выводились некоторые формулы, для решения конкретных задач, которые предлагалось использовать в практике. Однако, чаще всего из-за их громоздкости и узости диапазона применения, в практике проектирования они не применялись.

Развитие численных методов привело к коренному перелому в аналитических исследованиях. Не разрешаемые аналитически задачи описания процессов теплообмена, задачи неравномерного распределения прочности в ледопородном ограждении, на настоящем этапе развития вычислительной техники легко решаются с большой точностью. Большие изменения произошли при проектировании процесса замораживания, если раньше проектирование предлагалось производить по неким зависимостям, полученным на обобщенных моделях, то теперь появилась возможность производить математическое моделирование для каждого конкретного объекта, учитывая его конкретную специфику. Это стало возможным благодаря широкому внедрению высокопроизводительных вычислительных машин и современных программных комплексов.

На современном этапе развития науки, главные центры фундаментальных исследований перемещаются из научно-исследовательских институтов в крупные высшие учебные заведения. Методика расчета процесса замораживания численными методами разработана в МГГУ, большое внимание этому уделяется в Северо-Восточном федеральном университете имени М.К. Аммосова.

В практике современного подземного строительства на приоритетное место ставят наиболее эффективные способы его реализации за кратчайшие сроки. Зачастую для определения времени замораживания выбирают такие методы расчета, которые за кратчайшее время обеспечивают наименьшие финансовые затраты. При этом не учитывают насколько такие методы подходят для конкретного случая. В результате оказывается, что расчетное время не соответствует условиям замораживания, и в итоге необходимо нести дополнительные расходы. Таким образом можно сказать, что время является важнейшим фактором, влияющим на стоимость производства работ по замораживанию горных пород, а к его расчету необходимо относиться так же ответственно, как и к определению параметров, описанных выше.

На сегодняшний день существуют разные методики расчета времени активного замораживания для создания ледопородных ограждений. Разрабо-

таны нормативные документы с приведенными в них формулами для расчета времени (Временные методические рекомендации по определению оптимальных параметров технологии замораживания пород при сооружении стволов шахт ВИОГЕМ; Технологические схемы замораживания горных пород при проходке вертикальных стволов шахт Донбасса ВНИИОМШС; Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию горных пород при строительстве метрополитенов и тоннелей ВСН 189-78). Проблема определения времени замораживания рассмотрена в научно технической литературе Н.Г. Трупаком, И.Д. Насоновым, Х.Р. Хакимовым, М.Н. Шупликом, Я.А. Дорманом, И.О. Королевым и другими видными отечественными учеными. Также данный вопрос был рассмотрен на первой международной конференции по замораживанию горных пород, проходившей в Бохуме в 1978 г.

Анализ имеющихся нормативных документов и научных работ по замораживанию горных пород показал, что аналитические формулы для расчета времени замораживания выводятся с учетом совершенно разных предпосылок. Но все они не в полной мере учитывают все исходные данные. В каждом методе фигурируют факторы, оказывающие различное влияние на конечный результат, т. е. в большей или меньшей степени влияют на время замораживания.

Такая ситуация связана с тем, что до сих пор не существует классического решения задачи о фазовом переходе между жидкой и твердой средой – так называемой задачи «Стеффана», а все решения основываются на принятых допущениях. В связи с этим по имеющимся формулам невозможно со 100% точностью определить, за какое время сомкнется ледопородное ограждение.

Дальнейшее совершенствование расчетных зависимостей для определения времени замораживания должно быть основано на разработке программного обеспечения, с помощью которого можно было бы вести расчеты по методикам, которые на данный момент сложны для расчетов.

Таким образом, проведенный анализ способа искусственного замораживания горных пород показал, что для его дальнейшего развития и совершенствования необходимо решить следующие задачи:

- исследование теплофизических свойств замороженных и талых горных пород;
- определение зависимости внутреннего теплообмена рассола со стенками замораживающей колонки;
- определение зависимости температуры рассола от его положения в колонке;
- продолжение исследований процесса тепло-массо обмена при использовании сухого льда для замораживания горных пород;
- разработка программного комплекса, который позволял бы моделировать процесс замораживания на ПЭВМ;
- разработка единой методики по определению времени активного замораживания горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильева М.В., Павлова Н.В.* Конечно-элементная реализация задачи замораживания фильтрующих грунтов // Математические заметки ЯГУ. – 2013. – Т. 20. – № 1. – С. 195–205.

2. *Жуков И.В.* Обоснование параметров новых конструкций колонок для интенсификации процесса замораживания грунтов в городском подземном строительстве. – М., 1989.

3. *Мишедченко О.А.* История развития способа искуственного замораживания пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 2. – С. 226–231.

4. *Никитушкин Р.А.* Обоснование параметров ресурсосберегающей технологии искусственного замораживания, дис. к.т.н. – М., 2011.
5. *Николаев П.В.* Опыт и перспективы развития ресурсосберегающих технологий замораживания грунтов в городском подземном строительстве// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 2. – С. 367–371.
6. *Рожин И.И.* Численное моделирование переходных процессов в прикладных задачах теплопроводности с фазовыми превращениями, дис. к. ф-м н., – Якутск, 2005.
7. *Трупак Н.Г.* Замораживание пород при сооружении вертикальных шахтных стволов. – М.: Недра, 1983.
8. *Шуплик М.Н.* Обоснование и разработка ресурсосберегающих технологий замораживания грунтов при строительстве городских подземных сооружений: дис. д.т.н. – М., 1989.
9. *Хакимов Х.Р.* Замораживание грунтов в строительных целях. – М.: Госстройиздат, 1962.
10. *Harris J.S.* Ground freezing in practice, Redwood Books, Wiltshire, Great Britain, 1995.
11. *Тим ван Хайден, Бьерн Вегнер*. Современная технология замораживания пород на примере двух объектов, находящихся на стадии строительства, состоящих из пяти вертикальных шахтных стволов // Горный журнал. – 2014. – № 9. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Вакуленко Иван Сергеевич – аспирант, e-mail: isvakulenko@mail.ru,
Николаев Петр Владимирович – аспирант,
НИТУ «МИСиС».

UDC 622.272:622.238

ANALYSIS AND OUTLOOK FOR DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL FREEZING OF ROCKS IN UNDERGROUND CONSTRUCTION

Vakulenko I.S., Graduate Student, e-mail: isvakulenko@mail.ru,
Nikolaev P.V., Graduate Student,
National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia.

The article analyzes the development of the method of artificial ground freezing during the construction of underground structures, the results of experimental and theoretical studies related to the definition of freezing time. It is shown that the importance of the development and improvement of methods of artificial freezing of soils has increased sharply in connection with the development of innovative technical solutions underground space development of megacities. development trend of numerical simulation methods substantiated for the process of soil freezing. In the article is designated the ability to produce mathematical modeling for each object. The basic directions for further improvement are offered for the method of artificial soil freezing.

Key words: ground freezing, Freezing station, ice-soil barriers, freezing column.

REFERENCES

1. Vasil'eva M.V., Pavlova N.V. *Matematicheskie zametki YaGU*. 2013, vol. 20, no 1, pp. 195–205.
2. Zhukov I.V. *Obosnovanie parametrov novykh konstruktsii kolonok dlya intensifikatsii protsessa zamorazhivaniya gruntov v gorodskom podzemnom stroitel'stve* (Substantiation of new design parameters of pipes for soil freezing intensification in underground urban construction), Moscow, 1989.
3. Mishedchenko O.A. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2010, no 2, pp. 226–231.
4. Nikitushkin R.A. *Obosnovanie parametrov resursosberegayushchei tekhnologii iskusstvennogo zamorazhivaniya* (Substantiation of parameters of resource-saving artificial freezing technology), Candidate's thesis, Moscow, 2011.
5. Nikolaev P.V. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2014, no 2, pp. 367–371.
6. Rozhin I.I. *Chislennoe modelirovanie perekhodnykh protsessov v prikladnykh zadachakh teploprovodnosti s fazovymi prevrashcheniyami* (Numerical modeling of transition processes in applied problems of thermal conduction with phase changes), Candidate's thesis, Yakutsk, 2005.
7. Trupak N.G. *Zamorazhivanie porod pri sooruzhenii vertikal'nykh shakhtnykh stvolov* (Rock freezing in vertical shaft sinking), Moscow, Nedra, 1983.
8. Shuplik M.N. *Obosnovanie i razrabotka resursosberegayushchikh tekhnologii zamorazhivaniya gruntov pri stroitel'stve gorodskikh podzemnykh sooruzhenii* (Substantiation and development of resource-saving technologies for soil freezing in underground urban construction), Doctor's thesis, Moscow, 1989.
9. Khakimov Kh.R. *Zamorazhivanie gruntov v stroitel'nykh tselyakh* (Soil freezing for construction purposes), Moscow, Gosstroiizdat, 1962.
10. Harris J.S. *Ground freezing in practice*, Redwood Books, Wiltshire, Great Britain, 1995.
11. Tim van Khaiden, B'ern Vegner. *Gornyi zhurnal*. 2014, no 9.