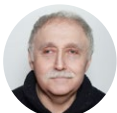


ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА АЗОТНОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ ПРИ СООРУЖЕНИИ ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

CHARACTERISTICS OF THE SOIL NITROGEN FREEZING PROCESS DURING THE UNDERGROUND RAILWAY CONSTRUCTION IN SAINT-PETERSBURG



Л. М. Барсуков,

АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»,
отдел проектирования организации
и механизации строительных работ

L. M. Barsukov,

JSC Scientific, research, design and survey
institute «Lenmetrogioprotrans», department
of construction works organization and
mechanization designing России



О. О. Шелгунов,

к. т. н., АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»,
отдел проектирования организации
и механизации строительных работ

O. O. Shelgunov,

Ph.D., JSC Scientific, research, design and
survey institute «Lenmetrogioprotrans»,
department of construction works organization
and mechanization designing

В статье рассмотрены технологические особенности процесса азотного замораживания грунтов при сооружении объектов метрополитена в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. Приведены температурные и расходные характеристики, полученные в результате контроля процесса азотного замораживания грунтов.

The article provides the technological features of the soil nitrogen freezing process during the underground railway construction in the engineering and geological conditions of St. Petersburg. The temperature and consumption characteristics obtained as a result of monitoring the soil nitrogen freezing process are given.

Строительство объектов метрополитена в Санкт-Петербурге осуществляется в сложных инженерно-геологических условиях. С целью обеспечения безопасности проходческих работ применяются различные специальные способы работ по закреплению неустойчивых водоносных грунтов [1], в том числе зональное замораживание жидким азотом. Использование криогенного продукта позволяет быстро и надёжно консолидировать ограниченные по объёму массивы грунта. Данная технология в нашей стране стала получать распространение с середины 70-х годов прошлого века [2].

В процессе вскрытия сантехнических и технологических скважин различного назначения подземными выработками в затрубном пространстве вокруг ствола скважины в водоносных грунтах формируется противифльтрационное ледогрунтовое ограждение. С этой целью столб жидкого азота, формируемый в обсадной трубе скважины, поддерживается на проектных отметках, произвольно удаленных от забоя данной скважины. Геометрические параметры столба жидкого азота в процессе замораживания контролируются термомпарами в режиме реального времени [3]. Первоначально основание столба жидкого азота в стволе скважины фиксировалось лабиринтным уплотнением, что не позволяло качественно замораживать грунты вокруг скважин диаметром более 200 мм

в связи с турбулентностью криогенного продукта в процессе теплообмена с грунтом через стенку обсадной трубы скважины, а также из-за значительного веса столба жидкого азота [4]. Специалистами метростроительного комплекса Санкт-Петербурга в середине 90-х гг. были разработаны специальные распределительные насадки для жидкостных зональных скважинных устройств. С тех пор такие устройства используются для замораживания грунтов вокруг скважин диаметром от 250 до 400 мм [4, 5].

Замораживание грунтов относится к скрытым производственным процессам, его эффективность и качество существенно определяют степень безопасности проходческих работ. В связи с этим контроль расхода жидкого азота и показаний многозонной термомпары (Т1, Т2, Т3, Т4) в режиме реального времени позволяют вносить оперативные корректировки в технологический процесс и анализировать эффективность проводимых работ. По завершении процесса замораживания на время работ по проходке, вскрытию и обустройству скважины осуществляется термометрический контроль за состоянием замороженного грунта, который носит дискретный характер, устанавливается дежурство с резервным запасом жидкого азота. Обустройство технологических скважин осуществляется после завершения процесса замораживания грунтов и демонтажа жид-



Рис. 1. Устье скважины на этапе дежурного наблюдения за показаниями температурных датчиков

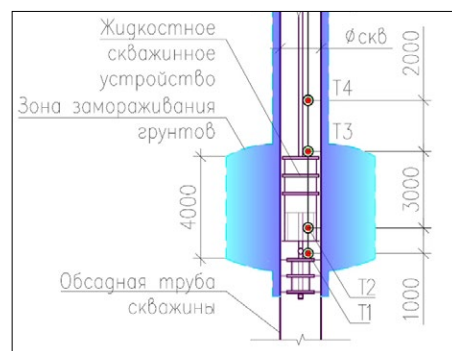


Рис. 2. Принципиальная схема размещения температурных датчиков в жидкостном зональном устройстве

Технологические характеристики скважин и процесса замораживания грунтов

N скв.	Характеристики скважин					
	Ø скв., мм (внутренний диаметр скважины)	Н слой, м (мощность водонос. слоя)	Н _{прз} , м (проектная мощность столба жидкого азота)	Т, ч (газовый и жидкостной режимы)	V _{прз} , т (проектный объем жидкого азота)	ТД, ч (время достижения температуры -2 °С)
1	300	0,2	4	16+64	12	166
2		0,25		14+48		312
3				14+34		334
4		0,3		24+42,5		171,5
5				18+40		186
6		0,65		12+50		318
7		0,85		10+37		383
8	150	0,3	4	14+40	8	88
9		0,65		10+40		216

костных зональных устройств.

В период с весны 2023 г. до лета 2024 г. при сооружении объектов Петербургского метрополитена было осуществлено вскрытие и обустройство 14-ти сантехнических скважин внутренним диаметром от 150 до 300 мм с применением зонального замораживания жидким азотом (рис. 1 и 2). Инженерно-геологические и гидрологические условия в районах ведения работ характеризуются наличием маломощных (от 25 до 85 см) прослоев грунтов, содержащих напорные воды, над сводами сооружаемых прикамков (от 1,5 до 8–10 м). Результаты контроля при производстве работ позволяют проанализировать особенности процесса замораживания

грунтов в данных условиях, выявить косвенные показатели эффективности технологического процесса.

В табл. приведены данные о процессе замораживания девяти сантехнических и технологических скважин, а также косвенные характеристики, полученные в результате анализа данных криогенного расходомера и термометрического контроля (датчики Т1, Т2, Т3, Т4) при замораживании грунтов.

Процесс замораживания грунтов жидким азотом начинается с захлаживания скважины в газовом режиме с целью сохранения целостности обсадной трубы и затрубной цементации – этот период составлял от 10 до 24 ч. После чего осуществляется вывод

в рабочий жидкостной режим с постепенным подъемом уровня столба азота до проектной отметки – основной этап работ по сливу жидкого азота составлял от 34 до 64 ч. В зависимости от диаметра скважин масса жидкого азота на газовый и жидкостной режимы замораживания составляла 8 т для скважин диаметром 150 мм и 12 т для скважин диаметром 300 мм. В связи с конструктивно-технологическими особенностями работ по вскрытию скважин подземными выработками и сооружению прикамков в ряде случаев возникла потребность в дополнительном (резервном) сливе жидкого азота.

По результатам обработки данных рабочих журналов подрядчика по термометрическому контролю и расходу жидкого азота были построены графические зависимости. Наиболее характерные графики технологических процессов приведены на рис. 3 и 4: отражен процесс азотного замораживания грунтов с дополнительным замораживанием резервным запасом жидкого азота в ходе работ по сооружению выработки (после фиксации температурных показаний -2 °С и дальнейшего роста температур до положительных значений).

По результатам анализа технологических процессов азотного замораживания грунтов и показаний термометрического контроля установлено:

- средний удельный расход жидкого азота составил от 39,5 до 72,5 кг м/ч, а также от 42,8

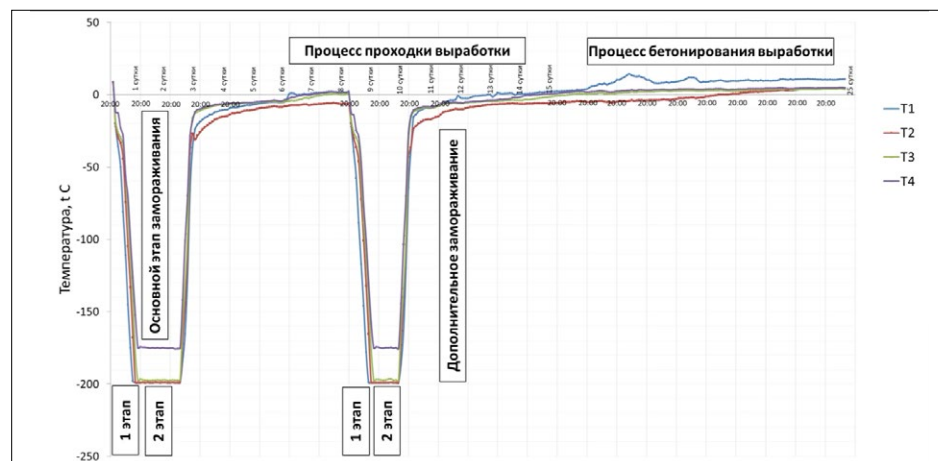


Рис. 3. Типовой график термометрии процесса азотного замораживания грунтов: I этап – газовый режим; II этап – жидкостной режим

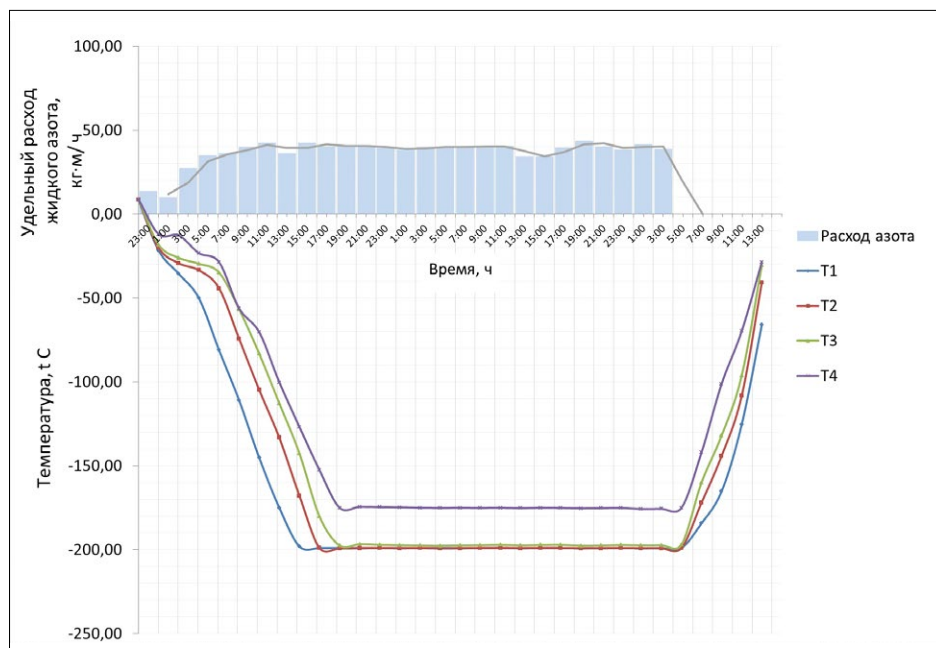


Рис. 4. График зависимости показаний температурных датчиков T1–T4 и изменений удельного расхода жидкого азота в процессе основного этапа замораживания

до 111,7 кг·м³/ч;

- время достижения температуры $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в процессе растепления составило от 88 до 383 ч.

Динамика изменений удельного расхода жидкого азота – косвенный показатель, при качественном выполнении работ характеризующий процесс теплообмена между криогенным продуктом и грунтовым массивом. При штатно протекающем процессе замораживания расход жидкого азота уменьшается по мере промерзания грунта до условно постоянного значения. В некоторых скважинах практически постоянно наблюдались колебания расхода, в других был отмечен даже рост расхода, тем не менее наиболее часто встречающимся оказывался расход 60–70 (кг·п. м/ч) 63,24–73,78 (кг·м³/ч) с постепенным снижением.

Время достижения температуры $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ после завершения замораживания жидким азотом возможно считать критическим, так как данная температура косвенно свидетельствует о начале растепления грунтового массива в затрубном пространстве. Оттаивание до температуры $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ служит ориентиром при комиссионном рассмотрении потребности в дополнительном (резервном) сливе жидкого азота в тех случаях, когда этого может требовать производственная ситуация при сооружении подходов выработок. Среднее время достижения температуры $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило порядка 168–240 ч (7–10 суток), максимальное время превышало 300–312 ч (13 суток) и достигало 383 ч (~16 суток). В некоторых скважинах из-за близости замораживаемого горизонта к своду прикаммерка оттаивание происходило гораз-

до быстрее, в особенности при интенсивных горнопроходческих работах или бетонировании, поэтому диапазон времени растепления достаточно широкий.

Заключение

Процесс азотного замораживания грунтов остается крайне чувствительным к технологическим особенностям, его эффективность значительно зависит от квалификации персонала подрядной организации, а также состояния технологического оборудования (расходомер криогенной цистерны, система контроля температуры в стволе замораживаемой скважины). В частности, при осуществлении термометрического контроля процесса замораживания, возможно лишь косвенно оценивать состояние и температуру формируемого противодиффузионного ледогрунтового ограждения в затрубном пространстве скважины. Степень детализации инженерно-геологических изысканий может также оказывать весомое влияние на эффективность замораживания грунтов жидким азотом. Логистика и стабильность криогенного обеспечения строительства, координация между организациями, осуществляющими замораживание грунтов и горнопроходческие работы, а также конструктивно-технологические особенности прикаммерка могут в значительной степени влиять на время оттаивания и интенсивность растепления.

В сравнении с другими способами замораживания грунтов, азотная технология имеет ряд преимуществ при закреплении относительно небольших объемов грунта, а именно:

- экологическая безопасность, поскольку жидкий азот не загрязняет грунт, а при испа-

рении полностью уходит в атмосферу;

- высокая скорость и эффективность замораживания, так как температура жидкого азота достигает $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- мобильность процесса, поскольку для проведения процесса азотного замораживания не требуется наличие значительных энергопотребностей;
- экономичность, так как при наличии технологических или сантехнических скважин не требуется бурения дополнительных замораживающих скважин.

Все вышеизложенное характеризует технологию азотного замораживания как наиболее эффективную при решении задач локализованного закрепления неустойчивых водоносных грунтов.

Ключевые слова

Специальные способы работ, азотное замораживание грунтов, ледогрунтовое ограждение, жидкий азот.

Special methods of construction works, soil nitrogen freezing, ice-soil fencing, liquid nitrogen.

Список литературы

1. Комбинированная технология закрепления грунтов в подземном строительстве Санкт-Петербурга / В. А. Марков, И. В. Ильин, Л. М. Барсуков, Д. Ю. Артюхов, М. С. Светикова // Метро и тоннели. – 2016. – № 6. – С. 59–60.
2. Авторское свидетельство № 588289 СССР, МПК Е 02 D 3/12, Устройство для замораживания грунта: №2191946/33: заявл. 21.11.1975 г.; опубл. 15.01.1978 г. / Н. А. Бучко, С. Х. Дукаревич, В. М. Капустин, Н. И. Кулагин и др. – Бюл. № 2.
3. Филонов, Ю. А. Автоматизированная система «СКАТ-24» / В. А. Маслак, М. О. Райнус // Научно-технический журнал тоннельной ассоциации «Метро». – 1998. – № 1–2. – С. 23.
4. Способ зонального азотного замораживания грунтов / Ю. А. Филонов, Ю. Ф. Герусов, М. О. Райнус, Л. М. Барсуков // Научно-технический журнал тоннельной ассоциации «Метро». – 1998. – № 1–2. – С. 22.
5. Патент № 2149240 Рос. Федерация, МПК Е 02 D 3/115, Устройство для зонального азотного замораживания грунтов: № 98112957/03: заявл. 24.06.1998 г.; опубл. 20.05.2000 г. / В. Н. Александров, Ю. А. Филонов, В. А. Маслак, В. А. Марков, Ю. Ф. Герусов, Л. М. Барсуков, М. О. Райнус – патентообладатель ОАО по строительству метрополитена в Санкт-Петербурге «Метрострой».

Для связи с авторами

Шелгунов Олег Олегович

OShelgunov@lmgt.ru

Барсуков Леонид Михайлович

LBarsukov@lmgt.ru