

УДК 551.345

И.И. Гнатюк¹, Р.Г. Мотенко²**ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ОТТАИВАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСЫПНЫХ ГРУНТОВ***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Западная Сибирь — важная база добычи нефти и газа. Месторождения обустроены, как правило, на насыпных грунтах, которые нарушают термический режим пород и вызывают развитие разнообразных инженерно-геологических процессов и явлений. Представлены результаты определения теплофизических характеристик насыпных грунтов, отобранных на четырех месторождениях Западной Сибири. Выполнены теплотехнические расчеты для определения глубины сезонного оттаивания и дана оценка влияния теплофизических свойств насыпных грунтов на изменение мощности сезонно-талого слоя.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, насыпные грунты, теплофизические характеристики, теплотехнические расчеты.

Western Siberia is an important base for oil and gas production. The main number of deposits are arranged on bulk soils that violate the thermal regime of rocks and cause the development of a variety of engineering and geological processes and phenomena. The paper presents the results of determining the thermophysical characteristics of bulk soils selected at four fields in Western Siberia. Thermotechnical calculations were carried out to determine the depth of seasonal thawing and an assessment was made of the influence of the thermophysical properties of bulk soils on the change in thickness of the seasonally thawed layer.

Key words: permafrost, bulk soils, thermophysical characteristics, thermotechnical calculations

Введение. Добыча нефти и газа в районах Западной Сибири сопровождается множеством факторов, которые необходимо учитывать при освоении и эксплуатации месторождений. К основным из них относятся природно-климатические особенности территории и высокая уязвимость природной среды, что связано с распространением здесь многолетнемерзлых пород (ММП). Распространение ММП на территориях месторождений ставит нефтегазоконденсатные компании перед необходимостью разрабатывать и реализовывать мероприятия, направленные на снижение техногенного воздействия объектов нефтедобычи на состояние многолетней мерзлоты [Макарский, Губайдуллин, 2010]. Решение таких задач возможно при использовании передовых технических способов обустройства нефтяных месторождений с учетом природно-климатических условий региона, с организацией системы наблюдения за состоянием верхней части геологической среды, а также с прогнозом изменения геокриологической обстановки под влиянием техногенных изменений условий теплообмена пород с внешней средой. Для прогноза необходимо знание входных параметров, к которым относятся свойства грунтов, такие, как влажность, плотность, коэффициент тепло-

проводности, теплоемкость, температура начала замерзания, содержание незамерзшей воды и др.

Освоение территории в области развития криолитозоны всегда проводится с изменениями поверхностных условий в связи с уничтожением или преобразованием напочвенных теплоизолирующих покровов (растительного, снежного), преобразованием верхних частей инженерно-геологического разреза при выемках, замене грунта, создании насыпи [Булдович, 2012]. На месторождениях Западной Сибири в качестве оснований инженерных сооружений используются, как правило, насыпные грунты, поэтому необходимо особое внимание уделять изучению их состава, строения и свойств. Цель работы — определение теплофизических характеристик насыпных грунтов разного гранулометрического состава в различном диапазоне влажности и плотности для дальнейшего проведения теплотехнических расчетов.

Объект исследования. Для решения поставленных задач были выбраны насыпные грунты четырех нефтегазоконденсатных месторождений с разными геокриологическими условиями. Первая группа месторождений в административном отношении расположена в Надымском районе Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, аспирант; *e-mail*: ivanka.gnatyuk93@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; доцент; *e-mail*: rmotenko@mail.ru

области (месторождения I и II), вторая группа месторождений — в Ханты-Мансийском автономном округе (месторождения III и IV).

Месторождения I и II. Среднегодовая температура воздуха $-5,5^{\circ}\text{C}$. Абсолютный минимум температуры приходится на февраль и составляет -58°C [СП. 131.13330.2012]. Мощность многолетнемерзлой толщи превышает 30 м. Температура грунта на глубине 7–10 м составляет $-0,6 \dots -1,2^{\circ}\text{C}$. Изменение мощности сезонно-талого слоя (СТС) для территории месторождения варьирует от 0,3–0,6 до 2–3 м [Геокриология..., 1989].

Месторождения III и IV. Среднегодовая температура воздуха $-3,4^{\circ}\text{C}$. Абсолютный минимум температуры приходится на февраль и равен -53°C [СП. 131.13330.2012]. Мощность ММП составляет 5–10 м, реже 30–50 м, температура пород колеблется от $-0,2$ до $-0,3^{\circ}\text{C}$. Глубина протаивания 0,7–2 м [Геокриология..., 1989].

На рассматриваемых месторождениях в качестве насыпных грунтов использованы пески разной дисперсности, отобранные с близлежащих карьеров.

На месторождении I использованы пески, отобранные в карьере, который находится в 58 км от г. Надым в пос. Шевелевские Пески, карьер № 3. Полезную толщу карьера слагают среднеплейстоценовые прибрежно-морские осадки салехардской свиты, представленные песками разной крупности.

На месторождении II использовали пески, отобранные в карьере № 4 в 100 км от г. Надым (Ныдинский район). В разрезе вскрыты пески салехардской свиты преимущественно средней крупности, в незначительном объеме — мелкие.

Для месторождений III и IV использованы пески из карьера № 3 в районе пос. Сосновка. В геологическом строении рассматриваемого участка принимают участие среднечетвертичные ледниковые отложения самаровского оледенения, представленные мелкими песками.

Для экспериментальных исследований песчаные грунты отбирали непосредственно на месторождениях с территорий расположения нескольких кустов скважин. Для месторождения I — это мелкие пески и пески средней крупности без включений, а также с примесью органического вещества и техногенно загрязненные; для месторождения II — пески средней крупности без включений и с наличием ожелезнения; для месторождений III и IV были отобраны мелкие пески без включений и с ожелезнением (таблица).

Материалы и методы исследований. Для всех экспериментальных исследований теплофизических свойств были подготовлены грунтовые пасты с заданными значениями влажности и плотности. Значения плотности скелета грунта (ρ_d) задавали равными $1,5\text{--}1,7 \text{ г/см}^3$, а значения влажности — в диапазоне 7–25%.

Определение теплофизических характеристик проводили с помощью автоматизированного измерителя теплофизических свойств «ИТС– λ с–10 грунт» и методом регулярного режима I рода в талом и мерзлом состоянии. Прибор «ИТС– λ с–10 грунт» позволяет определять коэффициент теплопроводности и удельную теплоемкость породы в диапазоне температуры от -25 до $+20^{\circ}\text{C}$. Погрешность определения теплопроводности этим методом составляет $\pm 7\%$, для теплоемкости —

Гранулометрический состав насыпных грунтов

Номер месторождения	Номер куста	Обозначение песка	Содержание частиц, %								Наименование грунта по ГОСТ 25100-2011	Примечания
			>10 мм	10–5 мм	5–2 мм	2–1 мм	1–0,5 мм	0,5–0,25 мм	0,25–0,10 мм	0,10–0,05 мм		
I	1	Песок-1					0,5	35,0	49,4	15,1	Песок мелкий	
		Песок-2					2,0	55,4	34,3	8,3	Песок средней крупности	
	2	Песок-3					0,2	23,4	58,8	17,6	Песок мелкий	
		Песок-4					1,0	52,0	39,1	7,9	Песок средней крупности	
		Песок-5			1,3	2,2		95,8	0,7		Песок средней крупности	Техногенно загрязненный
II	1	Песок-6				11,6	18,9	39,0	24,1	6,4	Песок средней крупности	
		Песок-7				4,3	22,7	48,5	13,9	10,6	Песок средней крупности	
III	1	Песок-8					0,3	34,0	46,5	19,2	Песок мелкий	
	2	Песок-9					1,0	51,0	32,6	15,4	Песок мелкий	
IV	1	Песок-10					6,2	39,3	42,6	11,9	Песок мелкий	
		Песок-11				1	5,4	32,9	38,6	22,1	Песок мелкий	

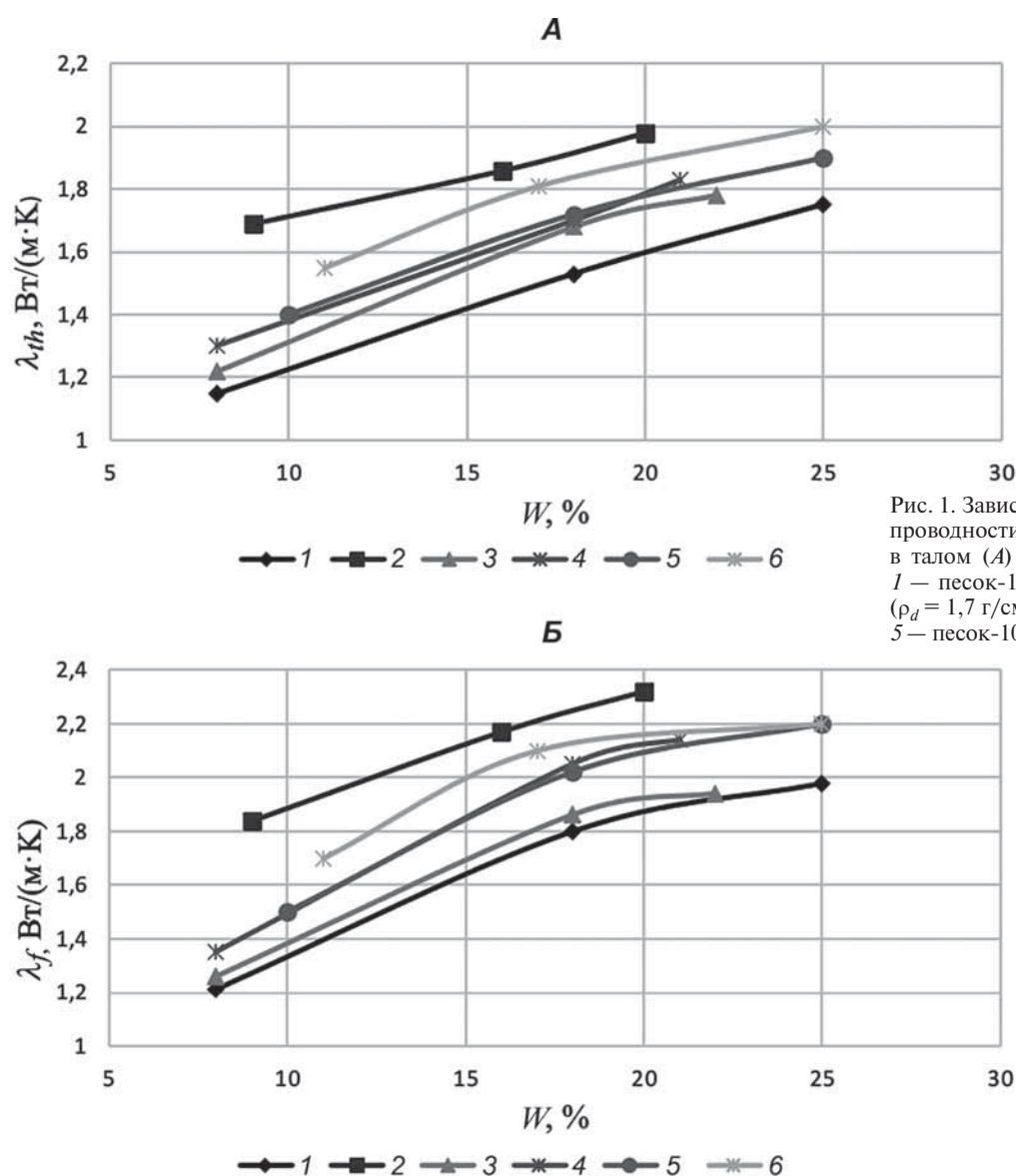


Рис. 1. Зависимости коэффициента теплопроводности мелких песков от влажности в талом (А) и в мерзлом (Б) состоянии: 1 — песок-1 ($\rho_d = 1,5 \text{ г}/\text{см}^3$); 2 — песок-3 ($\rho_d = 1,7 \text{ г}/\text{см}^3$); 3 — песок-8, 4 — песок-9, 5 — песок-10, 6 — песок-11 ($\rho_d = 1,6 \text{ г}/\text{см}^3$)

$\pm 10\%$ [Баранов и др., 2003; Теплофизические..., 2010; Гнатюк, Мотенко, 2015]. Методом регулярного режима I рода можно исследовать рыхлые горные породы в талом и мерзлом состоянии вне области интенсивных фазовых переходов. Метод технически прост, опыт и расчет эксперимента проводятся быстро и легко, вследствие чего возможно серийное исследование. К основным недостаткам относятся ограничения в температурном диапазоне, невозможность оценки свойств грунтов с ярко выраженной анизотропией (грунтов с различной лито- и криотекстурой), а также относительно невысокая точность ($\pm 10\%$) [Методы..., 2004].

В результате исследований получены фактические данные теплофизических свойств песков разного гранулометрического состава, отобранных на территориях четырех месторождений.

Результаты исследований и их обсуждение. Полученные экспериментальные данные проанализированы в зависимости от дисперсности, влажности и плотности в талом и мерзлом состоянии. Сопо-

ставлены осредненные данные о теплопроводности мелких песков всех месторождений (песок-1, -3, -8, -9, -10, -11) в диапазоне влажности $W=8\div 25\%$ и плотности скелета грунта $\rho_d = 1,5\div 1,7 \text{ г}/\text{см}^3$ (рис. 1). Коэффициент теплопроводности грунтов возрастает с увеличением влажности и плотности. Самые низкие значения коэффициента теплопроводности получены для песка-1 при $\rho_d = 1,5 \text{ г}/\text{см}^3$ и изменяются с ростом влажности в талом состоянии (λ_{th}) от 1,15 до 1,75 Вт/(м·К), в мерзлом (λ_f) — от 1,21 до 1,98 Вт/(м·К); максимальные значения установлены в песке-3 при $\rho_d = 1,7 \text{ г}/\text{см}^3$ и влажности $W = 20\%$: в талом состоянии $\lambda_{th} = 1,98 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, в мерзлом — $\lambda_f = 2,32 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

В образцах песка-8, -9, -10 и -11 плотность составляет $\rho_d = 1,6 \text{ г}/\text{см}^3$, но наличие ожелезнения в песке-11 повышает значение его теплопроводности приблизительно на 10% по сравнению с двумя другими песками.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента теплопроводности от влажности для песков

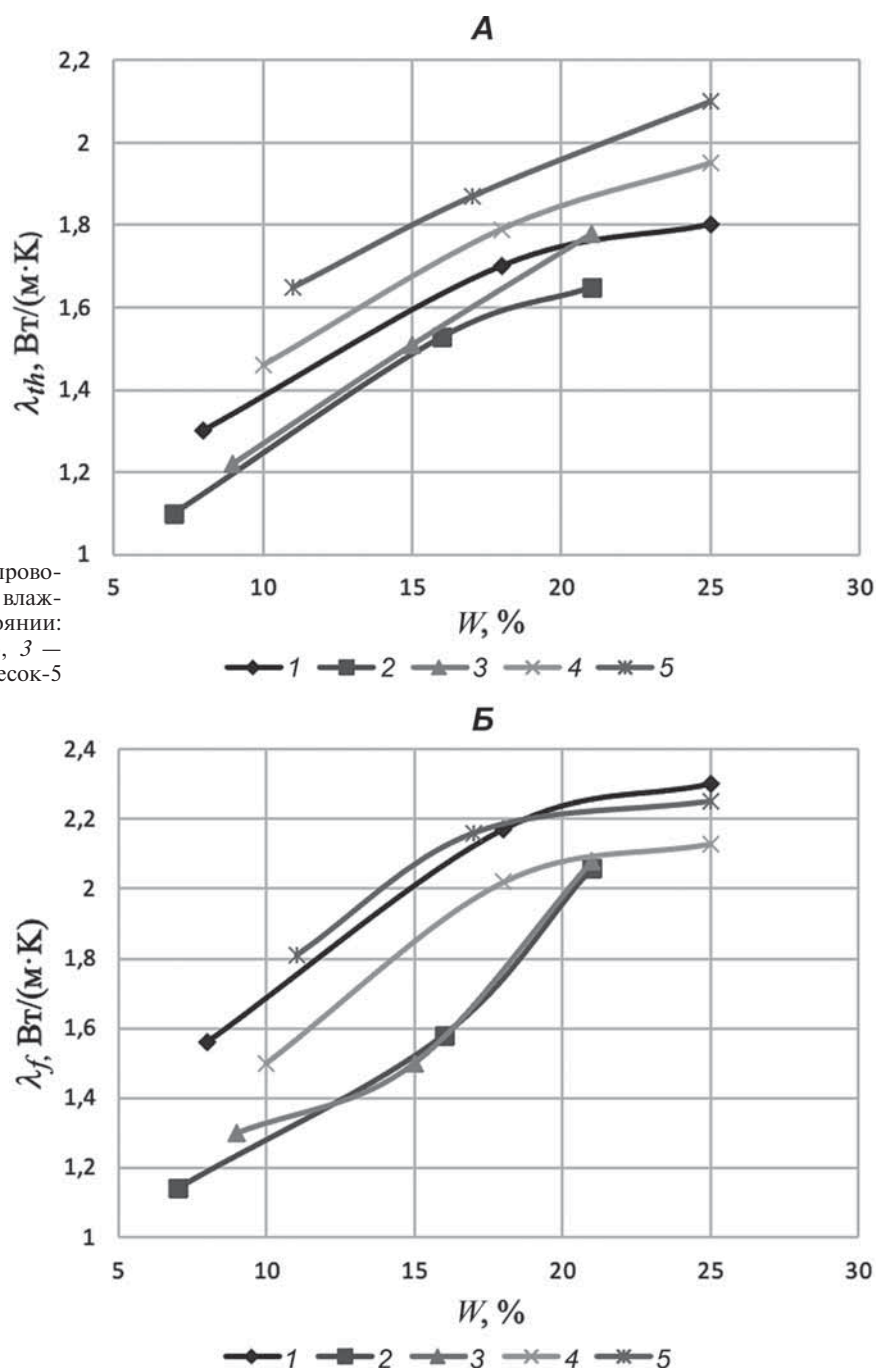


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности для песков средней крупности от влажности в талом (А) и в мерзлом (Б) состоянии: 1 — песок-2 ($\rho_d=1,5 \text{ г/см}^3$); 2 — песок-6, 3 — песок-7 ($\rho_d=1,6 \text{ г/см}^3$); 4 — песок-4 и 5 — песок-5 ($\rho_d=1,7 \text{ г/см}^3$)

средней крупности. К ним относятся пески-2, -4, -5, -6, -7. Наличие ожелезнения в песке-7 привело к самым высоким значениям теплопроводности для песков средней крупности.

Минимальные значения получены для песка, в котором присутствуют растительные остатки (песок-4) и для техногенно загрязненного грунта (песок-5), несмотря на то, что у них самая высокая плотность скелета грунта ($\rho_d = 1,7 \text{ г/см}^3$). Это закономерно, так как присутствие в грунте органического вещества понижает теплопроводность грунта из-за низкой теплопроводности органического компонента и увеличения содержания незамерзшей воды в мерзлом грунте [Роман, 1987; Алексютина, Мотенко, 2014]. Углеводород-

ное загрязнение также, как правило, приводит к снижению теплопроводности влагонасыщенных грунтов [Журавлев, Мотенко, 2005].

Значения удельной теплоемкости для образцов песка-1, -2, -3, -4, -5, -6, -7 получены экспериментально, а для образцов песка-8, -9, -10, -11 — рассчитаны по аддитивным соотношениям (СП 25.13330.2012). Изучение теплоемкости показало, что удельная теплоемкость (C_{th}) талых грунтов мало зависит от типа грунта и с изменением влажности возрастает от 940 до 1450 Дж/(кг·К). Для мерзлых грунтов значения теплоемкости ниже, чем для талых, и с ростом влажности ее величина изменяется от 810 до 1150 Дж/(кг·К). Отметим, что в основном для исследуемых образцов раз-

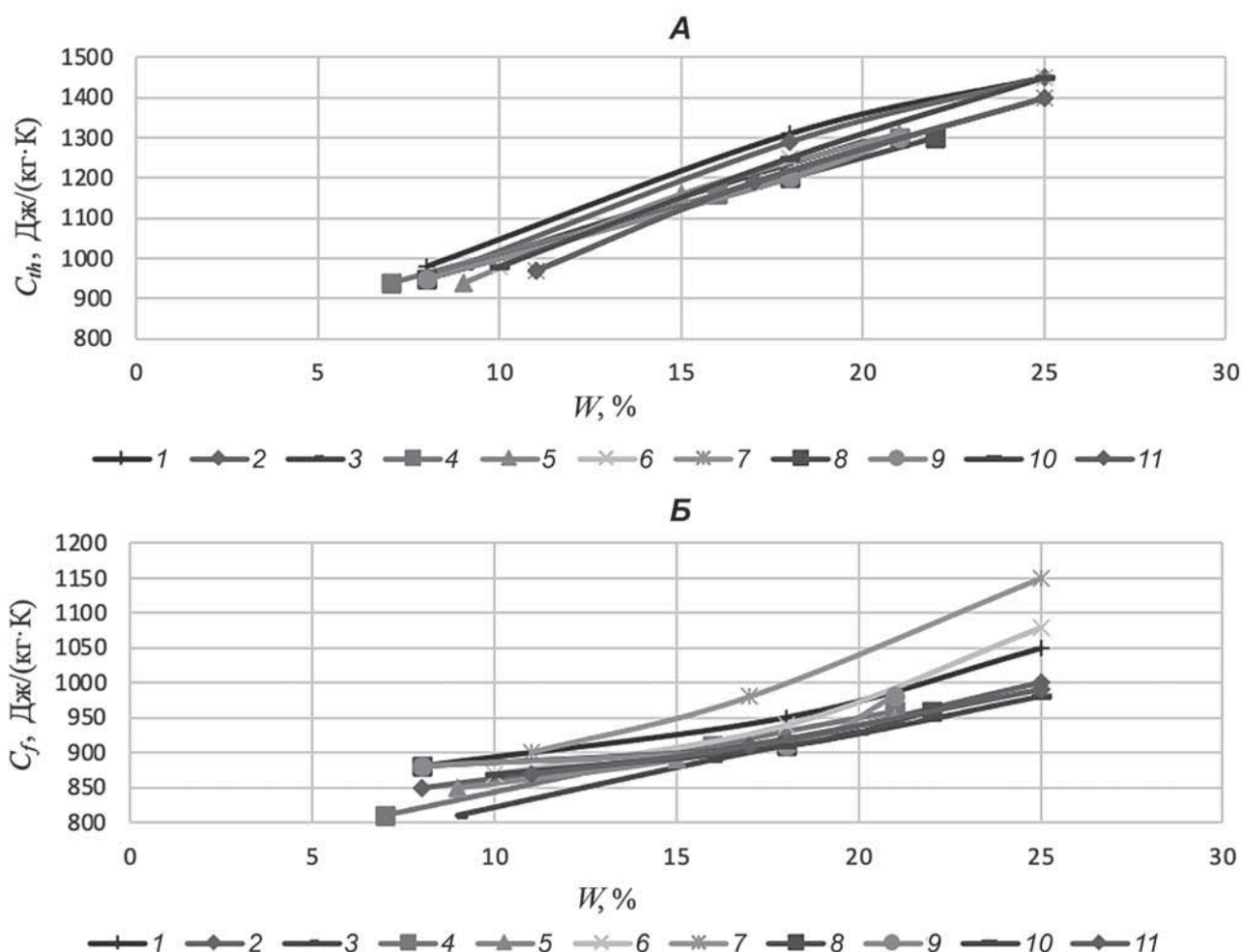


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости для песков разной дисперсности от влажности в талом (А) и в мерзлом (Б) состоянии: 1 — песок-1, 2 — песок-2, 3 — песок-3, 4 — песок-4, 5 — песок-5, 6 — песок-6, 7 — песок-7; 8 — песок-8, 9 — песок-9, 10 — песок-10, 11 — песок-11

личия также незначительные (<10%) (рис. 3). Исключение составили экспериментальные данные для песка-7.

Результаты теплотехнических расчетов. Теплотехнические расчеты выполнены в программе Permafrost 3D, позволяющей выполнять прогноз изменения температурного режима грунтов в трехмерном пространстве с учетом влияния как природных, так и техногенных факторов.

Теплотехнические расчеты проводили на 30 лет, что соответствует времени эксплуатации месторождений. Для оценки влияния теплофизических свойств только насыпных грунтов в качестве примера подстилающих пород был выбран суглинок. Характеристики грунта приняты по СП 25.13330.2012 следующими: $W = 20\%$, $\rho_d = 1,6 \text{ г}/\text{см}^3$, $\lambda_f = 1,56 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_{th} = 1,33 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Рассмотрим результаты расчетов для двух групп месторождений с разными геокриологическими условиями и оценим глубину сезонно-талого слоя (СТС) в зависимости от влажности для всех исследуемых песков (рис. 4, 5).

Для месторождений I и II в зависимости от вида грунта подсыпки мощность СТС (ξ) изменяется от 0,3 до 0,5 м при влажности 25% и от 0,8 до 1,15 м при влажности 8% (рис. 4).

Для менее теплопроводных песков при полном влагонасыщении (песок-1, -4, -5) $\xi \approx 0,31 \div 0,35 \text{ м}$, а для песков с большей теплопроводностью (песок-2, -3, -6, -7) $\xi \approx 0,39 \div 0,48 \text{ м}$. Для этих песков среднегодовая температура грунтов может быть выше 0°C при влажности $W > 20\%$. При влажности $W = 8\%$ изменение значений теплопроводности насыпных грунтов на 28% приводит к увеличению глубины СТС на 25% ($\Delta\xi = 0,3 \text{ м}$), а при полном влагонасыщении при изменении теплопроводности на 13% глубина СТС изменяется только на 16%.

На месторождениях III и IV (рис. 5) в качестве насыпных грунтов используют пески одной дисперсности. Для более теплопроводного песка-11 при полном влагонасыщении значения мощности СТС больше на 20%, чем для песков-8, -9, -10 ($\Delta\xi = 0,33 \text{ м}$). Среднегодовая температура грунтов

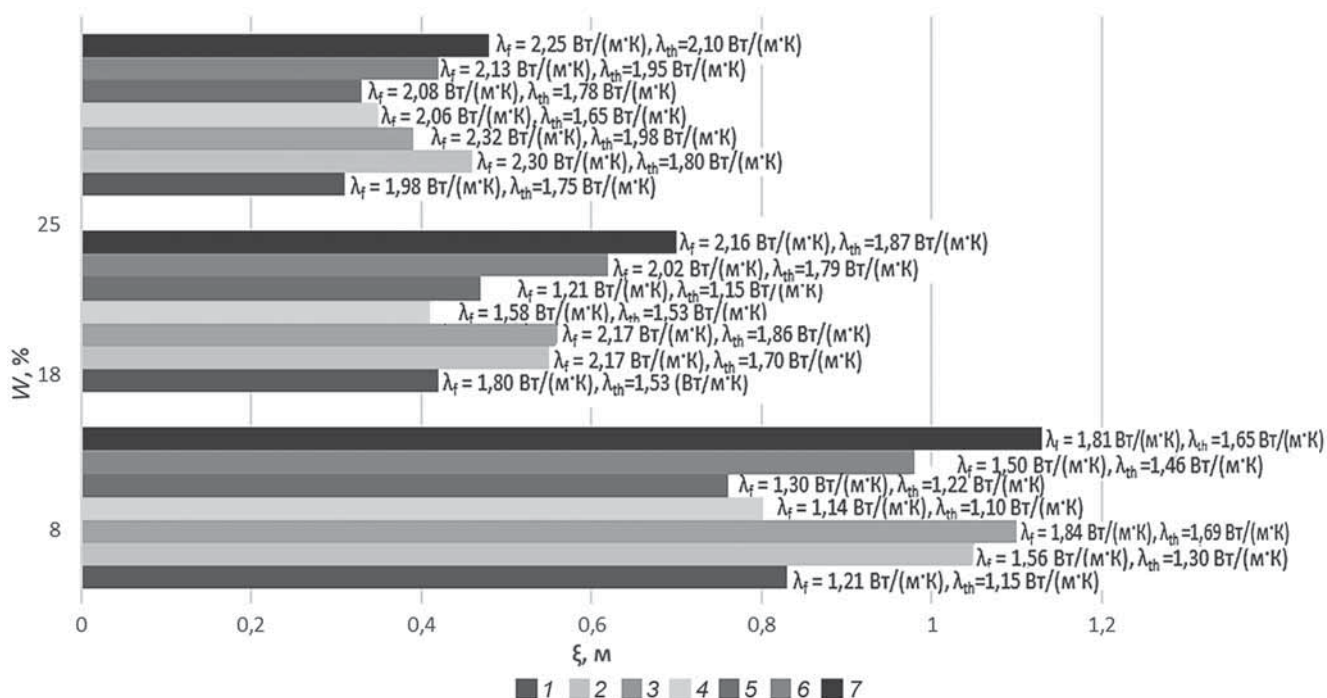


Рис. 4. Результаты изучения глубины СТС (ξ) в зависимости от влажности (W) при разных значениях теплопроводности насыпных грунтов для месторождений I и II: 1 — песок-1, 2 — песок-2, 3 — песок-3, 4 — песок-4, 5 — песок-5, 6 — песок-6, 7 — песок-7

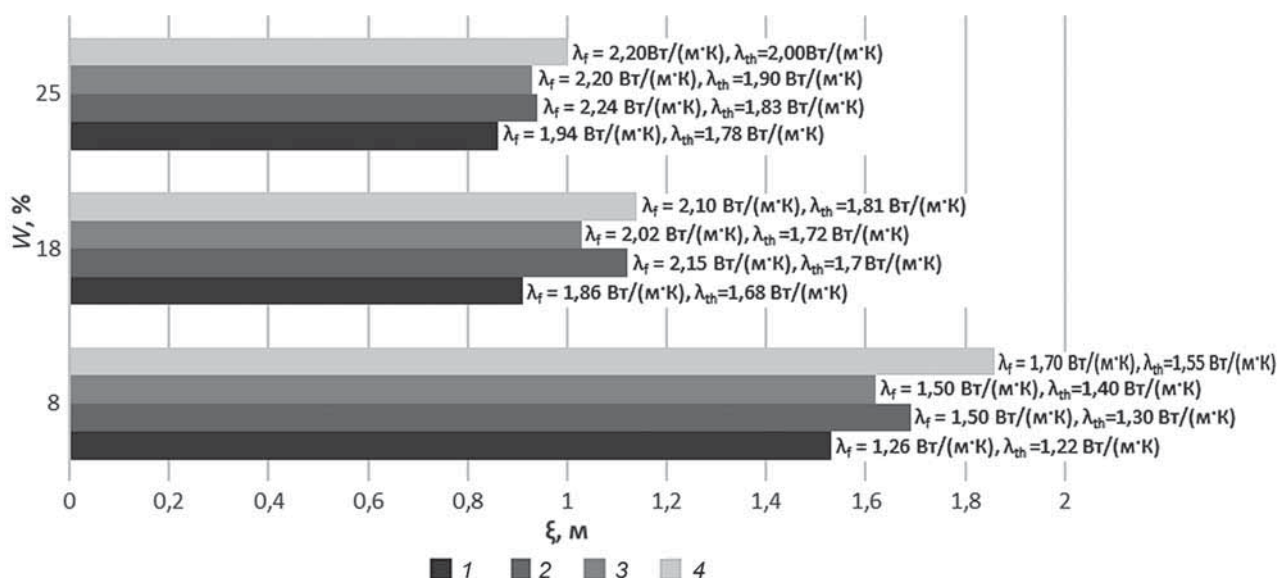


Рис. 5. Результаты изучения глубины СТС (ξ) в зависимости от влажности (W) при разных значениях теплопроводности насыпных грунтов для месторождений III и IV: 1 — песок-8, 2 — песок-9, 3 — песок-10, 4 — песок-11

становится выше 0°C для песка-11 при $W > 15\%$, для песка-9 — при $W > 18\%$. Максимальные значения мощности СТС соответствуют мелким пескам с наличием ожелезнения.

Заключение. На месторождениях Западной Сибири в качестве насыпных грунтов используются пески разного гранулометрического состава, отобранные с близлежащих карьеров. При отборе песков непосредственно на кустовых площадках выявлено, что свойства песков различаются по дисперсности, влажности, плотности, а также выявлено наличие органического вещества, оже-

лезнения и техногенного загрязнения, которые влияют на изменения значений теплофизических характеристик.

В результате исследований получены данные о теплофизических характеристиках грунтов в диапазоне влажности и плотности, которые необходимо учитывать при проведении теплотехнических расчетов. Результаты моделирования показали влияние теплофизических характеристик грунтов подсыпок на становление границы СТС.

Наличие органического вещества понижает теплопроводность грунта. Углеродородное загряз-

нение также, как правило, приводит к снижению теплопроводности влагонасыщенных грунтов. Наличие ожелезнения в песках при прочих равных условиях повышает значение теплопроводности на ~10%. Значения удельной теплоемкости мало различаются для рассматриваемых песков.

Для первой группы месторождений (месторождения I и II) изменение значений теплопроводности насыпных грунтов на 28% приводит к увеличению глубины СТС на 25% ($\Delta\xi = 0,3$ м) при влажности 8%, а при полном влагонасыщении при изменении теплопроводности на 13% глубина СТС изменяется на 16%.

Для второй группы месторождений (месторождения III и IV) при использовании более теплопроводного влагонасыщенного песка значения мощности СТС больше на 20%, чем для песков -8, -9, -10 ($\Delta\xi = 0,33$ м); при влажности 8% и изменении теплопроводности на 28% глубина СТС изменяется на 21%. Среднегодовая температура грунтов становится выше 0 °С для песка-11 при $W > 15\%$, для песка-9 — при $W > 18\%$. Максимальные значения

мощности СТС соответствуют мелким пескам с наличием ожелезнения.

Значения мощности СТС для второй группы месторождений (месторождения III и IV) в целом выше, чем для первой (месторождения I и II), что связано с более «мягкими» геокриологическими условиями.

Присутствие органического вещества, ожелезнения и техногенного загрязнения сильно влияет на теплопроводность песков и, соответственно, на геокриологические условия участка. Техногенные загрязнения, такие, как разлив углеводородного сырья, разлив пластовых вод, буровых растворов и промывочных жидкостей, могут существенно изменить не только теплофизические характеристики, но и фазовый состав влаги, температуру начала замерзания и др. Поэтому при освоении и эксплуатации месторождений для предотвращения создания аварийных ситуаций необходимо определять физические характеристики грунтов, в том числе насыпных, и контролировать их изменение в ходе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексютина Д.М., Мотенко Р.Г. Оценка влияния засоления и содержания органического вещества в мерзлых породах западного побережья Байдарцкой губы на их теплофизические свойства и фазовый состав влаги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2016. № 2. С. 59–63.

Баранов И.В., Платунов А.Е., Платунов Е.С. Комплекс автоматизированных приборов для измерения тепловых свойств // Научное приборостроение. 2003. Т. 13, № 3. С. 19–24.

Булдович С.Н. Оценка устойчивости многолетнемерзлых пород к техногенным воздействиям при освоении северных территорий России // Вестн. РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2012. № 1. С. 47–60.

Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 454 с.

Гнатюк И.И., Мотенко Р.Г. Изучение теплофизических характеристик насыпных грунтов для оценки глубины сезонного оттаивания // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Мат-лы докл. XIII Общеросс. конф. изыскательских организаций. М., 2017. С. 320–324.

Журавлев И.И., Мотенко Р.Г., Ершов Э.Д. Формирование теплофизических свойств мерзлых дисперсных пород при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами // Геоэкология. 2005. № 1. С. 50–61.

Макарский Н.А., Губайдуллин М.Г. Результаты геокриологического мониторинга на Ардалинском нефтяном месторождении // Вестн. Поморского ун-та. Сер. Естественные и точные науки. 2010. № 1(10). С. 15–21.

Методы геокриологических исследований: Учеб. пособие / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 512 с.

Роман Л.Т. Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. М.: Наука, 1987. 224 с.

СП. 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с Изменениями № 1, 2). М.: Минстрой России, 2015.

СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Мин-во регион. развития РФ, 2012.

Теплофизические измерения: Учеб. пособие / Под ред. Е.С. Платунова. СПб.: Изд-во СПбГУНиПТ, 2010. 737 с.

Поступила в редакцию 15.06.2020

Поступила с доработки 30.06.2020

Принята к публикации 30.06.2020