

Сергей Сергеевич ПРИМАКОВ¹
Людмила Александровна ПУЛЬДАС²
Игорь Васильевич ЗАБОРА³

УДК 624.139

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ СООРУЖЕНИЙ С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ ОСНОВАНИЙ

- ¹ кандидат технических наук,
начальник отдела многолетнемерзлых грунтов,
НОВАТЭК-НТЦ (г. Тюмень)
primakovss@yandex.ru
- ² кандидат технических наук,
доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции,
Тюменский индустриальный университет
puldsla@tyuiu.ru
- ³ аспирант кафедры прикладной и технической физики,
Тюменский государственный университет
zaboraiv@yandex.ru

Аннотация

На сегодняшний день для выполнения теплотехнических расчетов по определению теплосилового взаимодействия сооружений с многолетнемерзлыми грунтами широко применяется численное моделирование. Известным преимуществом численного моделирования является возможность учитывать ярко выраженную неоднородность грунта по глубине, сложный тепловой режим работы сооружений, а также сочетание различных условий теплообмена на поверхности. Однако недостатком такой сложной численной модели является в первую очередь вопрос о корректности ее построения и результатов моделирования.

Цитирование: Примаков С. С. Расчет теплового взаимодействия различных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами оснований / С. С. Примаков, Л. А. Пульдас, И. В. Забора // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 2. С. 43-58.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-43-58

В данной статье рассмотрена проблема определения достоверности численной гео-криологической модели. Ставятся задачи по определению критериев достоверности математической модели, а также по разработке методики, применение которой позволяет определять достоверность такой модели.

Решение данных задач подробным образом описано на примере, авторами введено понятие пространственно-временной характеристики гео-криологических условий, предложен комплекс критериев достоверности численной гео-криологической модели, а также разработана и предложена методика, применение которой позволяет говорить о достоверности численной гео-криологической модели.

Ключевые слова

Численное моделирование, многолетнемерзлые грунты, достоверность математической модели, гео-криологическое моделирование, распределение температуры, критерии достоверности, теплотехнические расчеты.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-43-58

Введение

Российская Федерация является северным государством, до 75% площади которой составляют территории распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Географическое расположение нашей страны, а также интенсивные темпы наращивания мощностей в развитии топливно-промышленного комплекса (ТЭК), расположенного преимущественно в регионах с распространением ММГ, требуют как разработки новых, так и совершенствования существующих методик, в том числе решения задач по взаимодействию объектов инфраструктуры с криолитозоной. На сегодняшний день решение вопроса прогнозирования устойчивости фундаментов на ММГ является одной из актуальных задач.

Основная часть

Главной особенностью многолетнемерзлых грунтов с точки зрения строительства различного рода сооружений является зависимость физико-механических свойств мерзлого грунта от его температуры. Одним из основных параметров в проектировании свайных оснований на ММГ является расчетное давление, которое могут выдерживать мерзлые грунты. Значение данного параметра существенно зависит от температуры грунта. Так, при повышении температуры мерзлого грунта от $-0,5$ °С до $-0,3$ °С расчетное давление, которое могут выдерживать мерзлые грунты под острием сваи, уменьшается практически в полтора раза с 1 300 кПа до 850 кПа. В работе [5] было подробно показано, как изменяется несущая способность сваи в течение сезона на разной глубине согласно сезонной динамике распределения температуры грунта.

Вместе с тем температура многолетнемерзлых грунтов постоянно меняется. Это происходит не только под влиянием сезонных климатических факторов, но также и в результате изменения при возведении различных сооружений условий

теплообмена на поверхности грунта (ветровых, снегозанесения, затенения) или прямого теплового воздействия сооружений на грунты оснований. Из этого следует, что прогнозирование температурных полей и определение динамики распределения температуры в грунте являются неотъемлемым этапом при расчете как устойчивости сооружений на мерзлоте, так и прогнозирования геокриологической обстановки в целом.

В настоящее время прогнозирование температуры грунта проводится главным образом численно [1, 4]. Известным преимуществом численного моделирования является возможность учитывать ярко выраженную неоднородность грунта по глубине, сложный тепловой режим работы сооружений, а также сочетание различных условий теплообмена на поверхности. Однако недостатком такой сложной численной модели является в первую очередь вопрос о корректности ее построения и результатов моделирования. Учитывая чувствительность механических свойств грунта к температуре, становится понятно, что одной из важнейших задач геокриологического моделирования при проектировании сооружений на многолетнемерзлых грунтах является определение достоверности выполняемых численных расчетов.

В данной статье ставится задача разработать методику определения достоверности численной геокриологической модели теплообмена в многолетнемерзлых грунтах и определить комплекс критериев достоверности такой модели.

В первом приближении задача по определению сезонной динамики распределения температуры грунта в естественных условиях может решаться в одномерной постановке, поскольку в отсутствие сооружений латеральные тепловые потоки значительно меньше вертикальных, а латеральная неоднородность грунта, как правило, значительно менее выражена, чем вертикальная [7]. Поскольку граничные условия на поверхности изменяются циклично, сезонно, то такая модель описывает одномерную задачу в динамике, которая не имеет начального и конечного момента времени, а описывает характер колебаний температуры грунта по глубине в различные моменты времени года. Такую модель будем называть 1Dt-моделью (1D + time).

Методика выполнения теплотехнических расчетов численным методом подробно описана в РСН 67-87 [7].

Математическая постановка задачи согласно РСН 67-87 [7]:

«Процесс распространения тепла в грунте в трехмерном пространстве описывается уравнением

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = d\omega(\lambda \text{grad}U) + F,$$

где $U(M, \tau)$ — температура грунта в точке $M(x, y, z)$ в момент τ ;

$H(M, U, \tau)$ — энтальпия (теплосодержание), отнесенная к единице объема грунта;

$\lambda(M, U)$ — коэффициент теплопроводности грунта;

$F(M)$ — плотность тепловых внутренних источников и стоков в единице объема.

Энтальпия является функцией температуры, времени и координат. Так как рассмотренные ниже выводы верны для всех точек пространства, то будем рассматривать энтальпию только как функцию температуры. С учетом теплоты фазовых переходов в грунте, энтальпия равна:

$$H(U) = \int_{0x}^U [C(\xi) + Q_{\phi} \delta(\xi - U^*)] d\xi,$$

где $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака;

$$C(\xi) = \begin{cases} C_T, & \xi > U^* & (\text{объемная теплоемкость талого грунта}) \\ C_{\text{эф}}(\xi), & \xi < U^* & (\text{эффektivная теплоемкость мерзлого грунта}); \end{cases}$$

$$C_T(M) = P_d(M) \cdot C_d(M) + W_{\text{tot}}(M) \cdot C_B; \\ C_{\text{эф}}(M, \xi) = \rho_d(M) \cdot C_d(M) + v \cdot C_{\text{л}}(W_{\text{tot}}(M) - W_w(M, \xi))_i \cdot \rho_d(M) + \\ + C_B \cdot W_w(M, \xi) \cdot \rho_d(M) + \alpha(W_w(M, \xi))_i \cdot \rho_d(M);$$

$C_d(M)$ — удельная теплоемкость сухого грунта;

$\rho_d(M)$ — плотность сухого грунта;

C_B — удельная теплоемкость воды;

$C_{\text{л}}$ — удельная теплоемкость льда;

α — теплота фазовых переходов;

$W_{\text{tot}}(M)$ — суммарная влажность грунта в долях к весу абсолютно сухого грунта;

$W_w(M, \xi)$ — незамерзшая вода при температуре ξ , принимается в виде

$$W_w(M, \xi) = \frac{A(M)}{B(M) - \xi} + C(M);$$

$A(M)$, $B(M)$, $C(M)$ — коэффициенты, задающие кривую незамерзшей воды при $\xi < \xi^*$ [7].

Численное решение теплотехнических задач энтальпийным методом позволяет учитывать все теплофизические особенности, характеристики многолетнемерзлых грунтов и прогнозировать их температурное состояние [7].

Результат такой модели описывает характер геокриологического состояния территории, который определяется комплексом теплофизических, климатических и других факторов, часть из которых изменяется во времени циклично в течение года. Следовательно, геокриологическое состояние территории вблизи исследуемой точки может быть описано с помощью двумерной диаграммы, где по оси абсцисс обозначается момент времени в году, а по оси ординат, направленной вниз, — глубина от поверхности грунта. Такую диаграмму будем называть пространственно-временной характеристикой (ПВХ) данной точки поверхности (рис. 1).

Такая ПВХ дает полную информацию о глубине сезонного оттаивания, среднегодовых температурах на разных глубинах, датах максимального оттаивания или промерзания, зонах с наиболее низкими температурами и моментах времени, когда эти температуры достигаются и т. д.

Дата	апрель				май				июнь				июль				август				сентябрь				октябрь				ноябрь						
h (m)	1.4	8.4	15.4	22.4	29.4	6.5	13.5	20.5	27.5	3.6	10.6	17.6	24.6	1.7	8.7	15.7	22.7	29.7	5.8	12.8	19.8	26.8	2.9	9.9	16.9	23.9	30.9	7.10	14.10	21.10	28.10	4.11	11.11	18.11	25.11
0.10	-13.42	-11.35	-8.11	-8.95	-9.29	-5.49	-4.84	-4.69	-4.54	8.69	10.29	10.75	10.88	18.66	19.61	19.82	19.96	20.06	14.88	14.61	14.64	14.66	6.87	6.35	6.26	6.24	6.24	-0.39	-1.41	-2.13	-2.66	-5.49	-6.42	-7.19	-7.86
0.20	-13.35	-11.19	-7.72	-8.61	-8.98	-5.57	-4.94	-4.65	-4.48	8.91	10.74	7.89	8.91	13.60	17.59	18.06	18.36	18.59	13.84	13.70	13.70	13.80	7.28	6.14	5.96	5.92	5.92	0.09	-0.38	-1.25	-1.88	-4.20	-5.21	-6.06	-6.79
0.30	-13.20	-11.01	-7.35	-8.29	-8.67	-5.64	-4.61	-4.42	-4.25	9.07	11.27	8.56	9.59	7.07	11.12	15.88	16.30	16.77	11.11	12.98	12.78	12.85	12.94	7.61	5.93	5.66	5.60	0.09	-0.12	-0.35	-1.10	-2.91	-4.01	-4.93	-5.73
0.40	-12.96	-10.82	-7.01	-7.97	-8.36	-5.69	-4.92	-4.57	-4.35	9.24	9.41	10.16	13.58	14.56	15.18	15.64	12.12	11.86	11.86	11.86	11.86	11.86	7.84	5.71	5.85	5.27	5.27	0.27	-0.08	-0.13	-0.30	-1.63	-2.81	-3.81	-4.67
0.50	-12.65	-10.62	-6.68	-7.66	-8.06	-5.72	-4.91	-4.52	-4.28	-1.11	1.40	3.42	4.96	7.87	11.59	12.83	13.60	14.18	11.24	10.94	11.07	11.22	7.95	5.48	5.04	4.95	4.94	0.44	-0.04	-0.10	-0.33	-1.61	-2.69	-3.62	-4.52
0.60	-12.29	-10.40	-6.39	-7.35	-7.77	-5.73	-4.88	-4.47	-4.21	-1.48	-0.45	1.61	3.55	5.86	9.62	11.12	12.03	12.73	10.33	10.02	10.19	10.37	5.23	4.73	4.62	4.62	4.62	0.59	-0.01	-0.10	-0.33	-1.61	-2.57	-3.56	-4.47
0.70	-11.88	-10.16	-6.11	-7.06	-7.48	-5.73	-4.85	-4.41	-4.14	-1.81	-0.61	-1.18	2.18	4.09	7.68	9.43	10.47	11.29	9.41	9.09	9.30	9.52	7.77	4.97	4.41	4.30	4.29	0.72	0.02	-0.09	-0.10	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42
0.80	-11.43	-9.91	-5.86	-6.77	-7.19	-5.70	-4.80	-4.35	-4.06	-2.09	-0.75	-0.48	0.86	2.50	5.80	7.76	8.92	9.86	8.48	8.17	8.42	8.68	7.48	4.68	4.09	3.97	3.97	0.83	0.05	-0.09	-0.10	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42
0.90	-10.97	-9.64	-5.63	-6.50	-6.91	-5.65	-4.75	-4.28	-3.98	-2.33	-0.88	-0.54	-0.40	1.04	4.01	6.12	7.38	8.46	7.52	7.25	7.54	7.84	7.08	4.38	3.76	3.64	3.64	0.90	0.07	-0.09	-0.10	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42
1.00	-10.49	-9.36	-5.41	-6.23	-6.63	-5.59	-4.69	-4.21	-3.90	-2.53	-1.01	-0.61	-0.50	0.32	2.36	4.49	5.86	7.08	6.55	6.33	6.67	7.01	6.58	4.05	3.43	3.32	3.32	0.95	0.08	-0.08	-0.10	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42
1.10	-10.01	-9.07	-5.22	-5.97	-6.36	-5.50	-4.62	-4.13	-3.81	-2.68	-1.13	-0.67	-0.52	-0.48	0.88	2.88	4.34	5.74	5.56	5.42	5.80	6.18	6.01	3.70	3.09	2.99	2.99	0.96	0.09	-0.08	-0.10	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42
1.20	-9.53	-8.76	-5.04	-5.72	-6.09	-5.40	-4.54	-4.04	-3.72	-2.78	-1.23	-0.72	-0.55	-0.50	-0.44	1.30	2.84	4.43	4.57	4.51	4.94	5.35	5.38	3.33	2.75	2.66	2.67	0.95	0.09	-0.08	-0.10	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42
1.30	-9.05	-8.44	-4.88	-5.47	-5.83	-5.28	-4.46	-3.95	-3.63	-2.85	-1.33	-0.77	-0.57	-0.51	-0.50	0.25	1.35	3.17	3.58	3.62	4.08	4.54	4.71	2.94	2.40	2.33	2.35	0.90	0.09	-0.08	-0.10	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42
1.40	-8.58	-8.12	-4.72	-5.23	-5.57	-5.14	-4.36	-3.86	-3.53	-2.88	-1.41	-0.82	-0.59	-0.52	-0.50	-0.47	0.12	1.94	2.59	2.75	3.22	3.73	4.01	2.53	2.05	2.00	2.02	0.83	0.07	-0.08	-0.10	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42
1.50	-8.11	-7.78	-4.58	-5.00	-5.31	-4.99	-4.25	-3.76	-3.42	-2.88	-1.48	-0.86	-0.61	-0.52	-0.50	-0.45	0.75	1.59	1.91	2.37	2.92	3.29	2.11	1.70	1.68	1.70	1.70	0.74	0.05	-0.09	-0.10	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42
1.60	-7.64	-7.43	-4.44	-4.77	-5.06	-4.83	-4.14	-3.65	-3.32	-2.86	-1.53	-0.90	-0.63	-0.53	-0.50	-0.49	-0.39	0.61	1.11	1.52	2.12	2.56	1.67	1.34	1.35	1.38	1.38	0.63	0.03	-0.09	-0.10	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42
1.70	-7.19	-7.08	-4.31	-4.55	-4.81	-4.65	-4.01	-3.54	-3.21	-2.81	-1.58	-0.95	-0.64	-0.54	-0.51	-0.50	-0.50	-0.49	-0.35	0.68	1.39	1.84	1.22	0.98	1.02	1.06	1.06	0.48	0.00	-0.09	-0.10	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42
1.80	-6.74	-6.72	-4.18	-4.33	-4.57	-4.47	-3.88	-3.42	-3.09	-2.75	-1.61	-0.95	-0.66	-0.54	-0.51	-0.50	-0.50	-0.48	-0.39	-0.15	0.54	1.11	0.76	0.62	0.69	0.74	0.83	-0.03	-0.10	-0.11	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42	
1.90	-6.29	-6.36	-4.05	-4.11	-4.33	-4.28	-3.74	-3.29	-2.97	-2.67	-1.62	-0.97	-0.67	-0.55	-0.51	-0.50	-0.50	-0.48	-0.42	-0.23	0.38	0.29	0.25	0.37	0.42	0.17	-0.07	-0.10	-0.11	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42		
2.00	-5.85	-5.99	-3.92	-3.90	-4.09	-4.08	-3.59	-3.16	-2.85	-2.58	-1.63	-0.98	-0.67	-0.55	-0.51	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.48	-0.44	-0.32	0.17	-0.11	0.04	0.10	0.00	-0.11	-0.13	-0.15	-0.34	-1.46	-2.47	-3.42	
13.89	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	

Рис. 1. Пример пространственно-временной характеристики (ПВХ) Fig. 1. Example of the space-time characteristic (STC)

Очевидным критерием достоверности ПВХ является сравнение результатов моделирования с результатами натуральных наблюдений, которые могут быть получены, например, на этапе проведения инженерно-геологических изысканий.

На практике основными показателями, характеризующими теплофизическое состояние грунтов, являются глубина сезонно-талого и сезонно-мерзлого слоя (СТС, СМС), температура на глубине нулевых амплитуд сезонных колебаний температуры грунта и сезонная динамика распределения температуры грунта.

Глубины СТС и СМС показывают границы мерзлых и талых грунтов и характеризуют интенсивность фазовых процессов для данных геологических и климатических условий. При производстве полевых работ в рамках проведения инженерных изысканий данные параметры определяются с достаточной точностью (до 10 см), поскольку хорошо выявляются механическим способом по нагрузке на буровой инструмент (шнек) оператором буровой установки. Таким образом, граница фазовых переходов на дату бурения является достаточно объективным показателем.

Температура на глубине нулевых амплитуд сезонных колебаний температуры грунта, или просто температура на глубине нулевых амплитуд, характеризует общую среднюю по разрезу среднегодовую теплопроводность верхних слоев для данных геологических условий и степень интенсивности процессов теплообмена на поверхности для данных климатических условий. Температура на глубине нулевых амплитуд редко бывает менее 10 м и определяется путем выполнения замеров температур грунта в специально оборудованных термометрических скважинах. Однако при производстве полевых работ в рамках проведения инженерных изысканий данные параметры определяются не вполне корректно, поскольку глубина термометрических скважин для исследования температуры грунтов определяется в первую очередь проектной глубиной фундаментов и зачастую бывает меньше фактической глубины нулевых амплитуд. Другими факторами неопределенности являются низкая разрешающая способность термометрического оборудования до 0,1 °С, отсутствие тарировок, нарушение ГОСТ на проведение термометрии, а именно: уменьшение времени выстойки термокос, использование низкотеплопроводных полиэтиленовых труб для обустройства термоскважин вместо стальных и пр. [8, 3]. Таким образом, температура на глубине нулевых амплитуд является менее объективным показателем, чем глубины СТС и СМС.

Сезонная динамика распределения температуры грунта характеризует вертикальную неоднородность распределения теплофизических характеристик грунта, а также интенсивность влияния климатических факторов и определяется путем замеров температур грунта на разных глубинах в разные моменты времени в специально оборудованных термометрических скважинах. Однако при производстве полевых работ в рамках проведения инженерных изысканий данные параметры никогда не определяются. Тем не менее при определении температуры на глубине нулевых амплитуд определяется и распределение температуры грунта по глубине. Недостатком такого замера является то, что он проводится только один раз, в момент проведения изысканий. Другими факторами неопределенности, так же как и в случае определения температуры на глубине нулевых амплитуд,

являются вопросы по оборудованию и культуре производства работ. Следовательно, в отсутствие фактических результатов замеров сезонной динамики распределения температуры грунта в качестве опорного значения для ее расчетного определения в дальнейшем может являться распределение температуры грунта по глубине на дату производства инженерных изысканий.

Таким образом, было определено несколько критериев достоверности численной прогнозной геокриологической модели.

Первый критерий достоверности ПВХ — это соответствие положения СТС и СМС в построенной модели фактическому значению, определенному при бурении геологических скважин в рамках инженерных изысканий. Первый критерий достоверности является наиболее представительным, поскольку границы между талыми и мерзлыми грунтами четко выражены, определяется механически при бурении, а погрешность при этом составляет порядка 0,1 м.

Второй критерий достоверности ПВХ — это соответствие температуры грунта на глубине нулевых амплитуд в построенной модели фактическому значению, определенному в термометрических скважинах в рамках инженерных изысканий. Второй критерий достоверности является менее точным относительно первого, поскольку погрешность определения фактической температуры грунта может достигать нескольких десятых долей градуса и существенно зависит от культуры производства работ.

Третий критерий достоверности ПВХ — это соответствие распределения температуры грунта по глубине в построенной модели фактическому на расчетную дату (дату проведения изысканий) значению, определенному в термометрических скважинах в рамках инженерных изысканий. Третий критерий достоверности является менее точным относительно второго, поскольку к погрешности за счет оборудования и культуры производства работ добавляется погрешность за счет сезонных климатических флуктуаций, влияющая на распределение температуры в грунте по глубине. Поэтому третий критерий может применяться в случае использования высокоточного оборудования при выполнении термометрии.

Практическое значение 1Dt-модели заключается в определении динамики геокриологического состояния в данной точке поверхности в естественных условиях при отсутствии какого-либо дополнительного теплового влияния от сооружений. Полученная на основе такой модели ПВХ позволяет определить начальные условия для дальнейшего численного 1D-, 2D- или 3D-моделирования теплообмена между сооружением и грунтами основания. При отсутствии ПВХ определить начальное распределение температуры не представляется возможным, за исключением даты проведения фактических замеров температуры, выполненных в рамках инженерных изысканий.

Критерием достоверности последующих численных 1D-, 2D- или 3D-моделей по определению теплового взаимодействия сооружений с грунтами оснований является их согласование с ПВХ на границах расчетных областей.

Как известно, размер расчетной области численной модели определяется отсутствием влияния границ на результат расчета. Другими словами, распреде-

ление температуры на удаленной от сооружения границе (боковой или нижней) не должно искажаться ввиду теплового влияния сооружения. Таким образом, корректность любой численной модели можно определить путем сопоставления распределения температуры на удаленной от сооружения границе модели с распределением температуры ПВХ на заданную дату выгрузки результата моделирования. Отличие температур на границе модели и ПВХ на величину, которая больше приборной погрешности, говорит либо о построении модели в отличных от ПВХ геокриологических или климатических условиях, либо о слишком малом размере расчетной области. В обоих случаях результаты расчетов, проведенных на такой модели, не могут считаться корректными.

Первый критерий достоверности модели — это соответствие положения СТС и СМС на дату выгрузки результата в построенной модели на удаленной боковой границе положению СТС и СМС на соответствующую дату в ПВХ.

Второй критерий достоверности модели — это соответствие температуры в построенной модели на удаленной боковой границе температуре на удаленной боковой границе в ПВХ.

Третий критерий достоверности модели — это соответствие температуры на нижней границе в построенной модели температуре на нижней границе ПВХ.

В случае, если в модели закладываются климатические изменения, ПВХ составляется не на один год, а на весь период эксплуатации сооружения с обоснованием изменения положения СТС/СМС и среднегодовой температуры на глубине нулевых амплитуд.

Таким образом, методика определения достоверности численной геокриологической модели сводится к последовательности простых проверок, в первом приближении не требующих специальных программных комплексов для выполнения теплотехнических расчетов, таких как:

- 1) применение ПВХ в качестве обоснования начального распределения температуры при составлении расчетной модели,
- 2) проверка первого критерия достоверности ПВХ,
- 3) проверка второго критерия достоверности ПВХ,
- 4) проверка третьего критерия достоверности ПВХ,
- 5) проверка первого критерия достоверности модели,
- 6) проверка второго критерия достоверности модели,
- 7) проверка третьего критерия достоверности модели.

При наличии инженерной насыпи проверка проводится аналогично с применением ПВХ, построенной с учетом насыпи.

В качестве примера была построена математическая модель для геологического разреза, приведенного в таблице 1. Характеристики грунтов, встречающихся в данном геологическом разрезе, приведены в таблице 2. Распределение температуры по глубине, полученное в ходе проведения инженерно-геологиче-

ских изысканий на 15.04.2017, приведено в таблице 3. Характеристики, приведенные в таблицах 1-3, получены в результате инженерно-геологических изысканий в соответствии с ГОСТ 25358-2012 «Грунты. Метод полевого определения температуры» [3].

Таблица 1

Геологический разрез,
используемый в примере

ИГЭ	Мощность, м
1	1,1
4	2,8
8	50
10	3

Table 1

The geological section used
in an example

Таблица 2

Характеристики грунтов,
встречающихся в геологическом
разрезе

ИГЭ	Тип грунта	Плотность грунта, кг/м ³	Влажность грунта, д. ед.	Теплоемкость талого грунта, ккал/м ³
1	торф	980	4,27	902,148
4	суглинок	1360	0,78	840,095
8	супесь	1895	0,23	670,644
10	песок	1975	0,21	591,885

Table 2

Characteristics of the soil that
is found in a geological section

ИГЭ	Теплоемкость мерзлого грунта, ккал/м ³	Теплопроводность талого грунта, ккал/(м · ч · К)	Теплопроводность мерзлого грунта, ккал/(м · ч · К)	Температура начала замерзания грунта, °С
1	572,792	0,696	1,144	-0,22
4	510,740	1,350	1,677	-0,20
8	541,766	1,488	1,582	-0,15
10	520,286	1,909	2,098	-0,10

Таблица 3

Распределение температуры
по глубине на 15.04.2017

<i>h</i> , м	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6
<i>T</i> , °С	-6,7	-5,4	-4,6	-3,9	-3,1	-2,1	-0,2	-0,3	-0,4

<i>h</i> , м	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>T</i> , °С	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5

Table 3

Distribution of temperature on depth
for 15.04.2017

По приведенным в таблицах данным была построена численная геокриологическая 1Dt-модель, ПВХ которой приведена на рис. 1.

Используя разработанную методику определения достоверности ПВХ, установим следующее:

- 1) глубина СТС в распределении, полученном по результатам инженерных изысканий, совпадает с глубиной СТС на ПВХ и составляет 2 м;
- 2) среднегодовая температура на глубине нулевых амплитуд (10 м), полученная по результатам инженерных изысканий, совпадает с температурой на ПВХ и составляет -0,5 °С;
- 3) распределение температуры по глубине на дату проведения термометрии (15.04.2017), полученное по результатам инженерных изысканий (таблица 3), совпадает с распределением на эту дату на ПВХ ниже СТС.

Результат определения достоверности ПВХ (рис. 1) приведен в таблице 4.

Таблица 4

Результаты определения
достоверности ПВХ

Table 4

Results of determination of reliability
of STC

Параметры сравнения	Инженерно-геологические изыскания	Пространственно-временная характеристика (ПВХ)
Глубина СТС, м	2	2 (на рис. 1 над белой чертой)
Среднегодовая температура на глубине нулевых амплитуд, °С	-0,50	-0,52 (на рис. 1 под белой чертой)
Распределение температуры по глубине на дату проведения термометрии 15.04.2017	Приведено в таблице 3	Выделено на рис. 1 зеленым цветом

Вывод: численная 1Dt-модель построена корректно, приведенная ПВХ является достоверной (рис. 1).

Для данных геокриологических и климатических условий был произведен теплотехнический расчет подземной теплоизолированной емкости с температурой продукта + 63,7 °С. Вдоль емкости с обеих сторон установлен ряд сезонно-охлаждающих устройств. Произведена замена грунта до глубины 3 м. На естественный грунт установлен теплоизолирующий экран.

На рис. 2 приведен пример результата теплотехнического расчета для подземной емкости, полученного после вычисления на геокриологической численной модели, для которой в качестве обоснования начальных условий применялась ПВХ (рис. 1).

Используя предложенную методику определения достоверности модели, установим следующее:

- 1) глубина СТС в распределении, полученном в результате вычисления на модели на 30 сентября, совпадает с глубиной СТС на ПВХ и составляет 2 м;
- 2) распределение температуры на удаленной боковой границе на дату выгрузки результата (30 сентября), полученного после вычисления на модели, совпадает с распределением на эту дату на ПВХ;
- 3) температура на нижней границе расчетной области, полученной в результате вычисления на модели, совпадает с температурой на нижней границе на эту дату на ПВХ и составляет $-0,59$ °С.

Результат определения достоверности модели (рис. 2) приведен в таблице 5.

Таблица 5

Результаты определения достоверности модели

Table 5

Results of determination of the model's reliability

Параметры сравнения	Пространственно-временная характеристика (ПВХ)	Результат теплотехнического расчета для подземной емкости
Глубина СТС, м	2 (на рис. 1 над белой чертой)	2 (на рис. 2 над желтой чертой)
Распределение температуры на удаленной боковой границе на дату выгрузки результата (30 сентября)	Выделено на рис. 1 красным цветом	Выделено на рис. 2 красным цветом
Температура на нижней границе расчетной области, °С	$-0,59$ (выделено на рис. 1 темно-синим цветом)	$-0,59$ (выделено на рис. 2 темно-синим цветом)

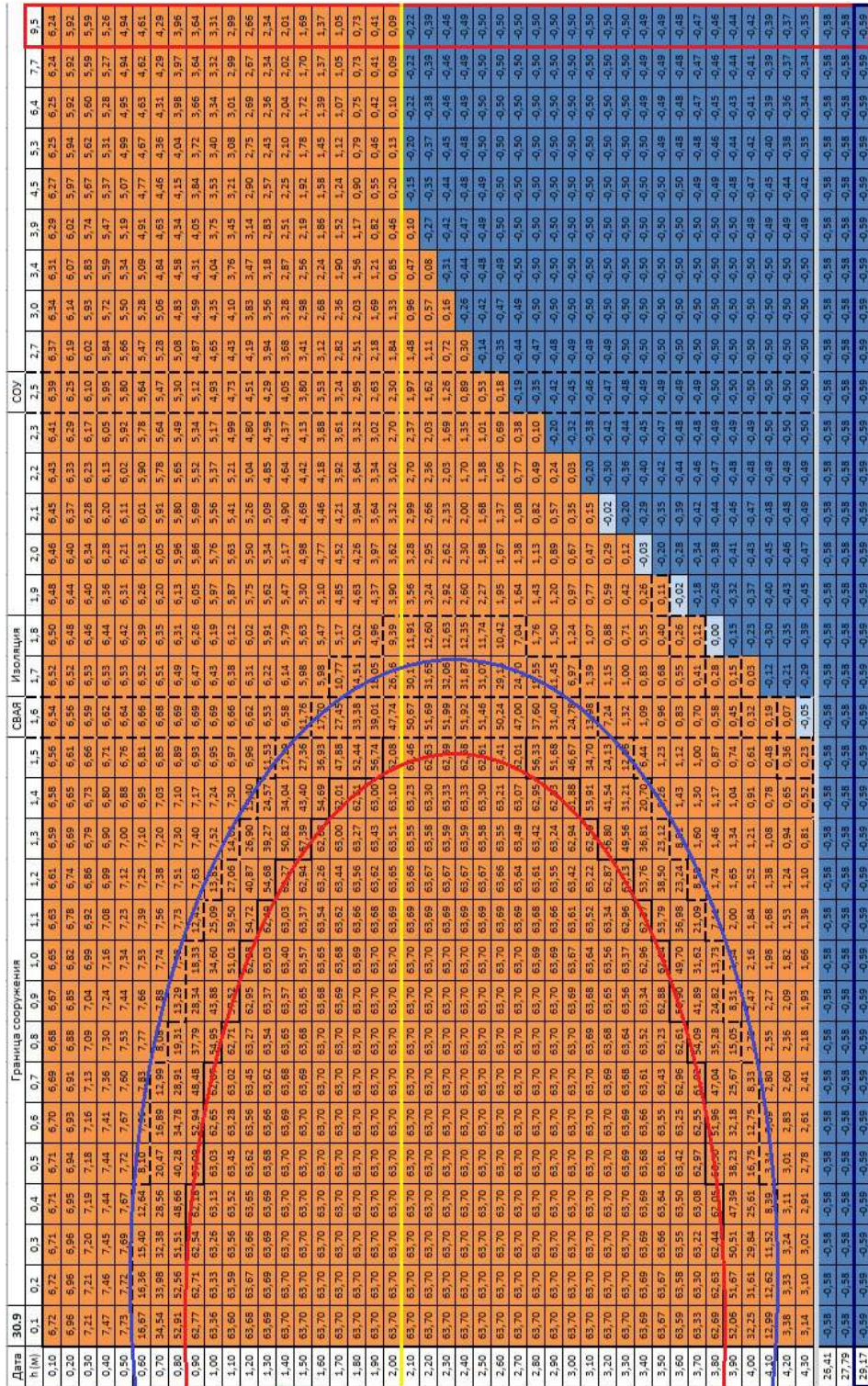


Рис. 2. Пример результата теплотехнического расчета пространственно-временной характеристики (ПВХ)

Fig. 2. Example of heattechnical calculation of the space-time characteristic (STC)

Таким образом, можно сделать вывод, что численная геокриологическая модель, на которой в результате вычисления получено распределение температуры для подземной емкости (рис. 2), является достоверной.

Предложенная методика позволяет достаточно просто и качественно оценить правильность построения модели, корректность используемых в ней параметров и определить достоверность численных теплотехнических расчетов теплового взаимодействия зданий и сооружений с ММГ на экспертном уровне без использования специализированного программного обеспечения.

Выводы

- 1) Введено понятие пространственно-временной характеристики геокриологических условий в точке поверхности как комплекса, описывающего динамику изменения геокриологического состояния грунтов в данных климатических условиях.
- 2) Предложен и описан механизм использования ПВХ как одного из инструментов построения корректной и достоверной численной модели для теплотехнических расчетов.
- 3) Предложен и описан комплекс критериев достоверности ПВХ и численной модели для теплотехнических расчетов по определению теплового взаимодействия различных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами оснований.
- 4) Разработана и описана методика по определению достоверности ПВХ и численной геокриологической модели теплообмена сооружений с многолетнемерзлыми грунтами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В. И. Математическое моделирование температурного режима грунтов оснований фундаментов в условиях многолетнемерзлых пород / В. И. Васильев, М. В. Васильева, И. К. Сирдитов, С. П. Степанов, А. Н. Цеева // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2017. № 1 (70). С. 142-159. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-1-142-159
2. Васильев В. И. Численное решение задачи промерзания грунта / В. И. Васильев, В. В. Попов // Математическое моделирование. 2008. Том 20. № 7. С. 119-128.
3. ГОСТ 25358-2012. Грунты. Метод полевого определения температуры. М.: Стандартинформ, 2013.
4. Крылов Д. А. Температурный режим вечномерзлого грунта под зданием со свайным фундаментом / Д. А. Крылов, А. А. Федотов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2013. № 3 (50). С. 106-116.
5. Примаков С. С. Влияние динамики распределения температуры многолетнемерзлых грунтов на оценку надежности фундаментов на примере

сезонного изменения несущей способности свай / С. С. Примаков, И. В. Забора, Э. А. Аринштейн, А. В. Татосов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 4. С. 41-50. DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-41-50

6. РД 39-Р-088-91. Инструкция по определению температурного режима вечномерзлых и сезонномерзлых грунтов и прогнозированию последствий изменения тепловых условий на поверхности // Министерство нефтяной и газовой промышленности СССР. 1991.
7. РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. М.: Госстрой РСФСР, 1987.
8. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Минрегионразвития, 2008. 140 с.

Sergey S. PRIMAKOV¹
Lyudmila A. PULDAS²
Igor V. ZABORA³

UDC 624.139

**CALCULATING THE THERMAL INTERACTION
OF DIFFERENT STRUCTURES WITH PERMANENTLY
FROZEN GROUNDS AT THE BASE**

- ¹ Cand. Sci. (Tech.), Head of Department of Permafrost Soil,
Novatek-STC (Tyumen)
primakovss@yandex.ru
- ² Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
Heatgas Supply and Ventilation Department, Industrial University of Tyumen
puldasl@tyuiu.ru
- ³ Postgraduate Student, Department of Applied and Technical Physics,
University of Tyumen
zaboraiv@yandex.ru

Abstract

Numerical modeling is widely applied for performance of heattechnical calculations for definition of heatpower interaction of constructions with permafrost soil. The known advantage of numerical modeling is an opportunity to consider pronounced inhomogeneity of soil in depth, a difficult thermal operating mode of constructions and a combination of various conditions of heat exchange on a surface. However, a lack of such difficult numerical model is first the question of correctness of its construction and results of modeling.

This article studies the problem of determination of reliability of numerical geocryologic model. Tasks of determination of criteria of reliability of mathematical model and of development of a technique which use allows defining reliability of such model are set.

Citation: Primakov S. S., Puldal L. A., Zabora I. V. 2019. "Calculating the thermal interaction of different structures with permanently frozen grounds at the base". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 2, pp. 43-58.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-43-58

The authors present the solution of these tasks, providing a concept of space-time characteristic of geocryologic conditions, the complex of criteria of reliability of numerical geocryologic model. They have also developed the technique and its application, which speaks for the reliability of numerical geocryologic model.

Keywords

Numerical modeling, permafrost soil, reliability of mathematical model, geocryologic modeling, distribution of temperature, criteria of reliability, heattechnical calculations.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-43-58

REFERENCES

1. Vasilyev V. I., Vasilyeva M. V., Sirditov I. K., Stepanov S. P., Tseeva A. N. 2017. "Mathematical modeling of temperature condition of soil of foundations of the bases in the conditions of permafrost breeds". *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya: Estestvennyye nauki*, no 1 (70), pp. 142-159. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-1-142-159 [In Russian]
2. Vasilyev V. I., Popov V. V. 2008. "Numerical solution of a problem of frost penetration in soil". *Mathematical Models and Computer Simulations*, vol. 20, no 7, pp. 119-128. [In Russian]
3. GOST 25358-2012. 2013. Soil. Method of Field Determination of Temperature. Moscow: Standartinform. [In Russian]
4. Krylov D. A., Fedotov A. A. 2013. "Temperature condition of permafrost soil under the building with the pile base". *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya: Estestvennyye nauki*, no 3 (50), pp. 106-116. [In Russian]
5. Primakov S. S., Zabora I. V., Arinshteyn E. A., Tatosov A. V. 2017. "The influence of the dynamics of temperature distribution of permafrost soils on assessing the foundations' reliability on the example of a seasonal change in the bearing capacity of poles". *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 3, no 4, pp. 41-50. DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-41-50 [In Russian]
6. RD 39-R-088-91. 1991. Instruction for definition of temperature condition of permafrost and discontinuous permafrost soils and for forecasting the consequences of surface thermal conditions' changes. USSR Ministry of the Oil and Gas Industry. [In Russian]
7. RSN 67-87. 1987. Engineering researches for construction. Forecasting the measurements of temperature condition of permafrost soil by numerical methods. Moscow: Gosstroy RSFSR. [In Russian]
8. Working Document SP 25.13330.2012. 2008. Construction Regulations. Basements and Foundations on Permafrost. Moscow: Minregionrazvitiya. [In Russian]