

Описание алгоритма программы «Термик»

Неклюдов В.В., н.с. ВНИМС ИМЗ им. П.И. Мельникова СО РАН

Введение

Программа «Термик» предназначена для работы с трехмерными (далее как 3D) температурными полями и их производных ответственных инженерных сооружений, в фундаментах которых на период строительства, или на период эксплуатации, применяются замораживающие станции.

Замораживающие станции в строительной индустрии применяются на протяжении уже многих десятилетий, наиболее известный пример – применение замораживающих станций при возведении некоторых линий Ленинградского метрополитена для гидроизоляции шахт и проходок от разрушающего влияния подземных вод вмещающих геологических толщ. После возведения тоннелей метрополитена, они цементируются уже с технической гидроизоляцией, а замораживающие станции демонтируются; однако при строительстве контроль морозного (гидроизоляционного) состояния пород и грунтов – важнейшая задача безопасности не только этого строительства, но и дальнейшей эксплуатации возведенных подземных производственных тоннелей.

В криолитозоне, применение замораживающих станций в целях поддержания вечномерзлого состояния пород и грунтов фундаментов многотонных надшахтных сооружений (высотных копров) с соответствующим мониторингом их температурного состояния должно обеспечиваться на *весь период* эксплуатации подземных рудников.

Таким образом – мониторинг температурного состояния пород и грунтов в объеме фундаментов крупных инженерных сооружений, возводимых в экстремальных, в т.ч. климатических условиях Севера, – важнейшая задача.

Актуальность

Помимо вышесказанного, актуальность построений трехмерных температурных полей, при наличии известных коммерческих программ трехмерного теплофизического моделирования (Термостаб-87, Frost-3D), связана с внедрением в настоящее время в геотехническую практику автоматизированных систем измерений произвольной частоты [1], в результате чего реальная надежность «де-юре» и безопасность эксплуатации крупных инженерных объектов, прежде всего Севера и Арктического шельфа, может повыситься в разы, а потребность в указанных дорогих коммерческих, но не всегда эффективных (и которые автоматически не имеют статуса де-юре), программах сведена к минимуму.

Алгоритм

1) Алгоритм работает с данными термометрической системы фундамента и его замораживающей системы так, что, в целом, реализуется САУ¹ с прямыми и обратными связями [1], где прямая связь реализуется термометрической системой, а обратная связь – замораживающей системой. Однако, контур обратной связи может быть отключен (неактивен), и тогда алгоритм реализует

¹ Система Автоматизированного Управления

классические 3D температурные построения. Далее, для прозрачности и наглядности, изложен алгоритм в варианте без обратных связей.

Данными для общего алгоритма выступают данные температурных измерений произвольной частоты в объеме фундамента, т.е. алгоритм работает с 3D пространственно распределенными температурными данными в рамках известного метода «последовательных состояний», применяемого в теплофизических и геотехнических расчетах медленно протекающих геотехнических процессов. В этих рамках задача алгоритма – быстрое построение 3D температурного поля между текущими промышленными измерениями автоматизированной термометрической системой, выявление возможных тепловых аномалий и их параметров, и передача этих параметров в контур обратной связи (если он активен) для компенсации этих аномалий.

Ядро алгоритма «Термик», в целях обеспечения надежности температурных построений при промышленной эксплуатации фундамента объекта, использует известные и проверенные интерполяционные алгоритмы, как двумерных так и трехмерных интерполяций триангуляционного типа применительно к т.н. «рассеянными данным».

Итого, алгоритм программы «Термик» – эвристическая авторская схема (далее как «схема»), оптимально² использующая известные 2D\3D интерполяционные алгоритмы рассеянных (температурных) данных³, близкие к классу триангуляций Делоне; в целях реализации классических (многоканальных) САУ по регулируемой коррекции температурного состояния, в частности, объема грунтов фундаментов крупных инженерных сооружений.

2) «Схема», реализующая оптимальное использование интерполяционных алгоритмов, состоит из двух основных блоков работы с температурными данными. Температурные данные получаются от двух типов «источников» – а) стационарные источники тепла с априорно известной температурой и б) собственно данные температурных измерений. Первый тип – это ствол шахты с квазистационарным температурным режимом, вентиляционные каналы, проходки и проч. также с примерно постоянной температурой. Второй тип – температурные датчики, монтируемые в логгерные гирлянды и устанавливаемые как в термометрические скважины (вертикальные), так и в шпурь (горизонтальные скважины), а также единичные датчики на входе и выходе замораживающей системы.

Для каждого типа данных формируется своя сетка, после чего «схема» объединяет 3D априорные температурные данные согласно геометрии фундамента и 3D текущие температурные данные термометрической системы в одну сетку.

После этого «схемой» формируется температурный параллелепипед (далее как куб) путем 3D интерполяции. Горизонтальные сечения куба на заданных глубинах далее называются планом. Однако, 3D интерполяция – времязатратный процесс, поэтому на практике, как альтернативная опция, нами используется построение куба путем поглубинного расчета 2D интерполяций в плане. После построения куба, без потери общей скорости расчетов, путем 2D интерполяций в плане для учета «межглубинных» аномалий (между известными глубинами), «схемой» применяется дополнительная межглубинная интерполяция осреднением (возможно с весом) температур

² В смысле времени работы программы

³ Natural neighbor interpolation

планов на соседних глубинах, что исключает возможность «пропуска» тепловых аномалий, находящихся между глубинами размещения температурных датчиков в термометрических скважинах.

В случае поглубинного построения планов (2D интерполяция), в процессе расчета результат интерполяции выводится с элементами геокриологической интерпретации – для специалистов геотехников дается распределение областей фазовых переходов (можно в диапазоне температур, указываемого в меню программы, по умолчанию -2С - 0С) в грунтах и породах (со скачком тепловыделения) в плане.

В случае 3D интерполяции «межглубинные» построения не требуются.

3) Основные объекты фундамента, предусмотренные в данной версии алгоритма: шахтный ствол глубиной до 2км, вентиляционные каналы сложной конфигурации как тепловые источники, свайное поле (множество определенным образом расположенных круглых и квадратных в сечении свай, общим числом до 200 штук и длиной до 60м, на которых необходимо определить искомые температуры), вертикальные термометрические скважины, по положению не совпадающими с положением свай, длиной до 70м, горизонтальные термометрические скважины длиной до 10м от ствола шахты, замораживающие колонки, не совпадающие с положением свай и термометрических скважин и длиной до 50м. Кроме этого предусмотрено задание элементов строительных чертежей – ростверков, тюбингов и т.п., автоматически наносимых на температурные планы. Расчеты и построения ведутся до максимальных глубин термометрических скважин.

4) *Детальность* температурных построений обеспечивается до получения температурных градиентов на поперечном сечении сваи с точностью до ее формы – круглая или квадратная. *Точность* температурных построений обеспечивается точностью используемых температурных датчиков – до сотых градуса Цельсия. Погрешность также определяется аппаратурной составляющей. Такие возможности, предоставляемые алгоритмом программы «Термик», которые в настоящее время отсутствуют в других геотехнических системах, позволяют эксплуатационникам оценивать т.н. температурные деформационные напряжения на сваях и других элементах (тюбинги и проч.) в целях контроля их разрушения⁴.

5) Обязательным элементом «схемы» является встроенная возможность вывода построенного температурного куба в формате, пригодном для дальнейшей работы в коммерческих графических программах, в частности, Golden Software, Tecplot и др.

6) Обязательным элементом «схемы» является возможность работы с многолетней базой данных термометрической системы как автоматизированных, так и неавтоматизированных температурных измерений. При этом, в рамках «схемы» имеется встроенная возможность получения разрезов скоростей промерзания-оттаивания а) в разрезах, б) в плане как отношение разности между пространственными положениями фиксированной изотермы к разности дат измерений; что важно для геокриологических оценок и исследований состояния грунтов фундамента рудника и т.п.

⁴ Имеются сведения о деформационных разрушениях тюбингов на некоторых крупнейших подземных рудниках в криолитозоне РФ

7) Обязательным элементом «схемы» является возможность *интерактивной* работы с построенным температурным кубом:

а) возможность перемещаться между поглубинными планами и вертикальными сечениями куба одним кликом,

б) задание дополнительных точек на заданном плане одним кликом с указанием температуры в ней и с перерасчетом интерполяции на этом плане,

в) применение т.н. «экстраполяции скважин» - на практике, скважины фундамента имеют разную длину: от коротких до длинных. В результате этого куб можно строить, фактически, только до глубин коротких скважин, что обесценивает саму идею 3D построений в геоинженерии. Реализованная *авторская* идея применения численной экстраполяции коротких скважин до длинных (с использованием температурных данных по соседним длинным скважинам как априорной информации с весом) с возможностью их последующей интерактивной коррекции позволяет строить полный куб до глубин длинных скважин, результаты представлены в [1].

При этом, анализ особенностей пространственного распределения температур целесообразно проводить в вышеуказанных профессиональных графических системах (п.5), учитывающих всевозможные потребности Заказчика, однако на основе построенного в «Термик» температурного куба.

8) Для автоматизированных измерений, в качестве модуля или опции, «схемой» реализован online - мониторинг на дисплее производственного компьютера динамики температур по всем термометрическим скважинам фундамента. Данная возможность позволяет оператору замораживающей станции напрямую визуально фиксировать появление трендов аномальных температур в текущей динамике и реагировать на нестандартные ситуации путем задания дополнительных параметров в контуре обратной связи в САУ «термометрическая система - резидентная программа – замораживающая система».

9) Алгоритм построен для версии «CPU-расчетов», однако по требованию Заказчика может быть без осложнений переносен на случай «GPU-расчетов».

Литература

1) В.В. Неклюдов, С.А. Великин, А.В. Малышев, Контроль температурного состояния оснований рудников в криолитозоне средствами автоматизированного мониторинга, Криосфера Земли, 2014, №4.