

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВО FROST 3D ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ

И.Н. Дембовский, Г.В. Грибовский

Беларусь, Минск, ООО «НТЦ «Симмэйкерс»

info@simmakers.ru

В докладе будут рассмотрены основные особенности компьютерного моделирования добывающих скважин и их теплового воздействия на многолетнемерзлые грунты во Frost 3D. Будут показаны особенности создания геометрии скважины, задания граничных условий, влияния шага расчётной сетки на точность получаемого решения. Также будут затронуты вопросы адаптации климатического граничного условия и учёта воздействия солнечной радиации в модели.

Введение. Теплотехнический прогноз является одним из основных этапов при проектировании добывающих скважин в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Для проведения такого прогноза на период всей эксплуатации скважины прибегают к компьютерному моделированию в специализированных программных комплексах, например таких, как Frost 3D. С помощью численного моделирования можно рассчитать трёхмерное нестационарное тепловое поле с учётом фазовых переходов «вода-лёд» и сезонно-охлаждающих устройств. Значимость проведения таких прогнозов описана в сводах правил СП 25.13330.2012, СП 11-105-97 и др. [1–3].

Создание корректной компьютерной модели требует знания особенностей проведения тепловых численных теплотехнических прогнозов в специализированных программных комплексах. В докладе будут рассмотрены основные особенности компьютерного моделирования во Frost 3D добывающих скважин и их теплового влияния на многолетнемерзлые грунты.

Геометрическая модель. Во Frost 3D происходит численное решение уравнения теплопроводности в грунте, а все внешние тепловые воздействия необходимо описывать с помощью граничных условий (ГУ). При создании трехмерной модели добывающей скважины нет необходимости учитывать все её конструктивные особенности. Достаточно создать общий вид скважины, однородную геометрию по границе “скважина-грунт”.

Граничные условия. Моделирование теплового влияния добывающей скважины на грунты во Frost 3D происходит с помощью задания ГУ условия 3 рода (теплообмен по Ньютону) на границе “скважина-грунт”. В данном ГУ необходимо указать температуру продукта в скважине и коэф. теплопередачи. При необходимости можно задать условия

изменения во времени данных параметров в процессе эксплуатации скважины. Конструктивные особенности скважины влияют на коэф. теплопередачи, который рассчитывается в зависимости от количества слоёв, их толщин и теплопроводности материалов. Рассчитать данный коэффициент возможно в калькуляторе условий теплообмена Frost 3D. Если по глубине изменяется конструкция, геометрия скважины, то это необходимо учесть при расчёте коэф. теплопередачи и задать разные ГУ на этих участках модели.

Такой подход при создании геометрической модели добывающей скважины и учёте её влияния на ММГ через ГУ ускоряет процесс подготовки компьютерной модели, позволит в дальнейшем задать больший минимальный шаг расчетной области, упростить дискретизацию модели и повысить скорость численного расчёта.

Симметрия модели. При подготовке компьютерной модели добывающей скважины позволительно уменьшить расчетную область в два или четыре раза и воспользоваться свойством симметрии модели. В плоскостях симметрии, разреза расчетной области необходимо задать условие симметрии: тепловой поток равный нулю (или ГУ 2 рода $q = 0$).

Симметрия применяется в том случае, если одна часть модели зеркально соответствует другой её части относительно плоскости симметрии. Если трёхмерная модель грунта имеет нетривиальную форму геологических слоёв или моделируемый объект имеет сложную, несимметричную форму относительно координатных осей, то необходимо полностью учитывать всю моделируемую область, а не только её половину или четверть.

Расчёт коэф. теплопередачи для скважин в футляре. Одним из способов обустройства добывающих скважин в условиях ММГ является использование специальных футляров, которые обеспечивают воздушную прослойку между внутренней и внешней стенками в конструкции скважины. В воздушной прослойке происходит конвективный, а не кондуктивный теплообмен, что обеспечивает дополнительную теплоизоляцию. Однако, такой способ обустройства скважины требует особого подхода при расчете коэф. теплопередачи от перекачиваемого продукта до границы с грунтом.

Существуют различные методики, которые позволяют рассчитать коэф. теплопередачи между двумя стенками с газообразным или жидким заполнением [4–6]. Ниже приведена методика М.А. Михеева [6] для расчета эквивалентного коэф. теплопроводности для воздушной прослойки:

$$\lambda_{\text{эк}} = \lambda \varepsilon_{\text{к}},$$

$$\varepsilon_{\text{к}} = \{1, Gr Pr \leq 10^3, 0,105 (Gr Pr)^{0.3}, 10^3 < Gr Pr \leq 10^6, 0,40 (Gr Pr)^{0.2}, 10^6 < Gr Pr \leq 10^{10},$$

$$Gr = 9,81 \beta \Delta T \frac{\delta^3}{\nu^2},$$

$$Pr = \frac{\nu}{\lambda},$$

$$\Delta T = T_c - T_g,$$

$$\beta = \frac{1}{273 + \Delta T},$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздушной прослойки, Вт/(м²·°C); ε_k – поправочный коэффициент для учета влияния конвекционного теплообмена; Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля; β – температурный коэффициент объемного расширения, K⁻¹; T_c – температура поверхности тела скважины, °C; T_g – температура поверхности тела футляра, °C; δ – толщина слоя воздушной прослойки, м.; ν – кинематический коэффициент вязкости воздушной прослойки, м²/с.

Использование коэффициента теплообмена без учёта конвективной составляющей при моделировании скважин в футляре может привести к недооценке радиуса оттаивания в более чем 4-8 раз [7].

Влияние расчетной сетки на точность решения. В процессе выполнения теплотехнического расчета перед проектировщиком зачастую стоит задача рассмотреть несколько вариантов возведения и дальнейшей эксплуатации сооружения. Для проведения первичных оценочных расчетов, с целью ускорения получения результатов, допускается воспользоваться достаточно грубой расчетной сеткой. Однако, при вынесении окончательного проектного решения, необходимо руководствоваться результатами расчёта, полученного на качественной, мелкодискретизированной в областях интенсивного теплообмена расчётной сетке.

Было проведено исследование влияния шага расчетной сетки на точность полученных результатов путём расчета ореола оттаивания грунта в плоском поперечном сечении добывающей скважины при различных параметрах расчетной сетки. Теплофизические свойства грунта, температура продукта в скважине и коэффициент теплообмена на границе “скважина-грунт” были заданы одинаковыми для каждого расчёта. Внешний радиус скважины составил 0,5 м. Была задана расчетная сетка с равномерным шагом в 0,5, 0,25, 0,1 и 0,05 м, а расчетный период составил 30 лет. По результату расчётов с шагом сетки 0,05 м радиус оттаивания грунта составил 5,65 м. При сравнении других результатов с расчётом с шагом сетки 0,05 м., максимальная абсолютная погрешность температур и радиуса оттаивания по модулю составила:

- шаг сетки 0,10 м - 0,01 °C и 0,05 м;
- шаг сетки 0,25 м - 0,27 °C и 0,10 м;
- шаг сетки 0,50 м - 0,50 °C и 0,65 м;

По результатам сравнения видно, что погрешность с увеличением шага расчетной сетки растет, однако позволяет с погрешностью в 12% определить радиус оттаивания грунта, не смотря на грубую дискретизацию добывающей скважины.

Калибровка климатических параметров. Проведение прогнозного моделирования является нетривиальной задачей [8] и во многом зависит от точности предоставляемых климатических данных [5, 6]. Перед проведением моделирования добывающей скважины, необходимо проводить верификацию, проверку исходных данных путём проведения расчёта в естественных условиях. Такой расчёт проводится без учёта теплового влияния скважины, тренда потепления и насыпных грунтов [3, 11, 12].

В случае значительных расхождений расчётных и наблюдаемых температур грунта, нужно проводить адаптацию, калибровку климатических параметров, необходимых для задания условия теплообмена модели на границе “грунт-воздух”. Можно варьировать любые параметры в модели, однако, это может быть не всегда эффективно и допустимо. Обычно прибегают к калибровке теплопроводности λ снегового покрова, т.к.:

- выбор λ не регламентируется нормативно-технической документацией РФ и явно не представлен в отчётах;
- зачастую неизвестно истинное среднезимнее значение (а тем более временной ход) коэф. теплопроводности снега;
- расчёт λ снега по его плотности происходит по различным эмпирическим формулам, различия между которыми при одинаковой плотности могут достигать 100-250% [13];
- при измерениях плотности снега на метеостанции не учитывают насыщенный водой снег, плотность воды под снегом и плотность ледяной корки на поверхности почвы [14];
- за счет их калибровки λ удастся добиться постоянства температуры на глубине нулевых теплооборотов [3, 11].

Учет воздействия солнечной радиации. Измерение температуры воздуха на метеостанции происходит в тени на высоте 2 м. над поверхностью земли [14]. Тем самым, если в ГУ компьютерной модели задать только температуру воздуха, полученную по метеостанции, то будет происходить недоучёт воздействия прямой солнечной радиации на грунт. Это может быть особенно важно при проектировании добывающих скважин в малооблачных регионах, а также, если по результату расчёта в естественных условиях будет наблюдаться малая глубина оттаивания грунта на конец летнего периода. В таких случаях рекомендуется учесть воздействие солнечной радиации на грунт согласно методике [15]:

$$t_{\text{гр}} = t + \Delta t_r - \Delta t_\varepsilon,$$

$$\Delta t_r = \frac{r}{\alpha},$$

$$\Delta t_\varepsilon = k \cdot \Delta t_r,$$

где t – температура воздуха по метеостанции, °С; Δt_r и Δt_ε – поправки к среднемесячным температурам воздуха за счет соответственно солнечной радиации и испарения, °С; r –

среднемесячная сумма радиационного баланса для рассматриваемого элемента поверхности, Вт/м²; α – коэффициент теплообмена на поверхности грунта, Вт/(м²·°C); k – коэффициент, учитывающий характер поверхности, принимаемый в первом приближении равным 0,8 для естественной поверхности и 0,3 – для оголенной.

При отсутствии достаточных данных допускается учитывать суммарную поправку путем прибавления к среднемесячным значениям температуры воздуха с апреля по сентябрь добавки $\Delta t = 3$ °C.

Вывод. При проведении численного теплотехнического прогноза необходим индивидуальный подход для каждой моделируемой площадки и объекта. Выполнение перечисленных рекомендаций разработчиков Frost 3D позволит более качественно подготовить компьютерную модель добывающих скважин и получить более точные результаты моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменением N 1). – Москва: Минрегионразвития. – 2013. – 140 с.
2. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. – Москва: Госстрой РФ. – 1999. – 25 с.
3. Горелик Я.Б., Паздерин Д.С. Корректность постановки решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21. – № 3. – С. 49-59.
4. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1958. – 417 с
5. СТО Газпром 16-2005 «Регламент по проектированию крепи добывающих скважин и их конструкций с учетом свойств мерзлых пород».
6. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344с.
7. Бакшеев В. В. Влияние конвекции при расчете теплопроводности среды для конструкции «труба в трубе» на примере устьев скважин и подземных переходов технологических трубопроводов // Томск : I научно-техническая конференция «Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений», ТомскНИПИнефть, 24 - 25 сентября, 2019
8. Кутуков С., Самигуллин Г.Х., Бадиков Ф.И. Использование интеллектуальных систем в мониторинге режимов эксплуатации нефтепроводов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2001. – Т. 1. – № 2.

9. Гарагуля Л.С. Методика прогнозной оценки антропогенных изменений мерзлотных условий. – Москва: МГУ. – 1985. – 185 с.
10. Ершов Э.Д. Общая геокриология. – Москва: МГУ. – 2002. – 682 с.
11. Марков Е.В. Проблемы задания граничных условий при моделировании теплового взаимодействия «горячих» трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 2 (ч. 10). – С. 210.
12. Долгих Г.М., Статистическое моделирование работы системы “ГЕТ”, установленной в основании нефтяного резервуара // *Криосфера Земли*. – 2015. – Т. 19. – № 1. – С. 70-77.
13. Чернов Р.А. Экспериментальное определение эффективной теплопроводности глубинной изморози // *Лёд и снег*, № 3 (123), 2013. С. 71-77.
14. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть I. Метеорологические наблюдения на станциях. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 301 с.
15. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования – Москва: Стандартинформ, 2019. – 35 с.