

Вх N 4/20  
от 07.05.2020

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе Ишкова Алексея Андреевича

### «Математическое моделирование функционирования систем температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Освоение природных богатств и развитие северных территорий связано с проектированием, строительством и эксплуатацией различных инженерных сооружений, контактирующих с многолетнемерзлыми грунтами, что непосредственно сказывается на их тепловом режиме, следовательно, на технических и конструктивных решениях задач инженерной защиты объектов строительства в криолитозоне. Для решения этих задач необходимо знать температурное поле грунтового основания в любой момент времени, поскольку это дает возможность обоснованно прогнозировать устойчивость зданий и сооружений в процессе их эксплуатации.

С развитием вычислительной техники появилась возможность получать при помощи вычислительного эксперимента достаточно достоверные данные о физических процессах, изучение которых в лабораторных или натуральных условиях очень сложно, а иногда просто невозможно, и всегда требует значительных затрат средств и времени. Суть вычислительного эксперимента предполагает построение математической модели, разработку алгоритма решения соответствующих начально-краевых задач и составление компьютерной программы для его численной реализации. Построенная математическая модель, позволяющая достоверно прогнозировать природные явления и надежно управлять сложными технологическими процессами, должна быть адекватной, т.е. математическая основа модели должна быть непротиворечивой и подчиняться всем обычным законам математической логики. Проверка модели осуществляется сравнением полученных результатов с экспериментальными данными или сопоставлением с результатами, полученными другими методами. Далее модель представляется в дискретной форме, удобной для применения численных методов, проводится исследование и разработка эффективного вычислительного алгоритма, реализующего рассматриваемую модель на компьютере. На последнем этапе создаются программы, переводящие модель и алгоритм на доступный компьютеру язык.

В диссертационной работе, целью которой является разработка физико-математической модели функционирования систем температурной стабилизации грунтов (ТСГ) с горизонтальным испарителем, решаются прикладные задачи, связанные с повышением надежности и долговечности инженерных сооружений, взаимодействующих с

многолетнемерзлыми грунтами. Построение адекватных математических моделей для прикладных задач теплового взаимодействия мерзлого (талого) грунта, окружающей среды и инженерного сооружения является насущной проблемой. Необходимость учёта все более сложных физических явлений, повышения достоверности получаемых при помощи математических моделей результатов, выявления возможных неизвестных ранее физических особенностей изучаемых процессов обуславливают несомненную **актуальность** темы диссертационной работы А.А. Ишкова.

**Научная новизна** заключается в разработке физико-математической модели функционирования систем ТСГ с горизонтальным испарителем, учитывающей конструктивные особенности системы (высота подъема конденсатора, длина испарителя), тепловое взаимодействие грунтового основания и атмосферы с конденсаторной и испарительной частями, тип циркулирующего хладагента, особенности поведения двухфазных потоков хладагента в контуре циркуляции. Введен параметр перегрева, который показывает, насколько отличается температура хладагента от температуры его парообразования. Определены верхние и нижние критические тепловые нагрузки, ограничивающие эффективность функционирования систем ТСГ с горизонтальным испарителем для различных типовых конструктивных решений и температурных характеристиках работы конденсаторной части.

**Практическая значимость** выполненной работы состоит в том, что созданы расчетный алгоритм и вычислительная программа, включающие в рассмотрение совокупность важнейших факторов, обеспечивающих качественный прогноз температурного режима функционирования систем ТСГ с горизонтальным испарителем. Полученные результаты могут быть использованы в научно-исследовательских и проектных организациях, специализирующихся в проектировании и строительстве различных инженерных сооружений в северных регионах и в условиях изменяющегося климата. Так, рекомендации соискателя по управлению температурного режима грунтовых оснований с помощью предложенной физико-математической модели систем ТСГ с горизонтальным испарителем нашли применение в деятельности ООО НПО «Фундаментстройаркос» (г. Тюмень) и ЗАО «ТюменьНИПИнефть» (г. Тюмень), что подтверждается справками о внедрении результатов диссертации.

Дадим краткую характеристику основных результатов диссертационной работы, в которых в той или иной мере отражены все основные элементы прикладного численного моделирования: математические модели технологических процессов, вычислительные алгоритмы и реализующие их программы, существенные для теории и практики выводы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и 4 приложений. Работа изложена на 160 страницах текста, включая 65 рисунков

и 29 таблиц. Библиография содержит 122 наименований, в том числе 20 источников из зарубежной литературы.

Во **введении** содержится обоснование актуальности темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, указываются научная новизна и практическая ценность работы, приводятся положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приводится обзор научной литературы по теме диссертации. Здесь рассмотрены методы температурной стабилизации грунтовых оснований, типы сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ). Показан механизм действия как одиночных СОУ, так и систем ТСГ с горизонтальным испарителем. Далее описана математическая постановка внешней задачи, т.е. задачи промерзания-протаивания грунтового массива при его тепловом взаимодействии с атмосферой, СОУ и объектом строительства. В модели учитываются поступление тепла конвекцией и излучением на дневную поверхность массива грунтов. Для численного решения трехмерной задачи типа Стефана используется метод Самарского-Моисеенко, т.е. метод сквозного счета со сглаживанием разрывных коэффициентов в уравнении теплопроводности по температуре в окрестности фазового перехода «лед - вода». Схема сквозного счета характеризуется тем, что граница раздела фаз явно не выделяется и используются однородные разностные схемы. При этом теплота фазового перехода вводится с применением  $\delta$ -функции Дирака как сосредоточенная теплоемкость в «эффективную» теплоемкость. Получаемая таким образом разрывная функция затем «размазывается» по температуре и не зависит от числа измерений и фаз. Кроме того, приведена дискретизация общего теплового потока, действующего на трубы испарителя систем ТСГ, и уравнения для определения температуры испарителя, исходя из характеристик конденсаторной части, температуры атмосферного воздуха и свойств хладагента.

Соискатель указывает, что при математическом моделировании теплового влияния систем температурной стабилизации на окружающий массив грунтов практически не учитываются процессы, которые происходят внутри СОУ. В связи с этим, во **второй главе** представлена физико-математическая модель функционирования систем ТСГ с горизонтальным испарителем, построенная на основе фундаментальных законов сохранения, проверенных феноменологических законов и законов термогидродинамики. Данная модель позволяет получить как температурный режим испарительной части, так и характеристики двухфазного потока хладагента внутри контура циркуляции. Факторы, учитываемые в математической модели, уже указывались при обсуждении научной новизны. С помощью программного продукта MathCAD рассчитаны параметры систем ТСГ с горизонтальным испарителем типовых конструктивных решений с различными входящими характеристиками при рабочей тепловой нагрузке. Получены значения верхних и нижних критических

тепловых нагрузок, при которых работа систем ТСГ с горизонтальным испарителем становится неэффективной.

**Третья глава** посвящена сравнению результатов численного моделирования с экспериментальными данными ООО НПО «Фундаментстройаркос», полученными на полномасштабном стенде горизонтальной естественно-действующей трубчатой системы (системы ГЕТ). При моделировании функционирования системы ГЕТ в качестве входных параметров выбраны длина труб испарителя, высота подъема конденсатора относительно труб испарителя, температура конденсатора и удельная тепловая нагрузка на трубы испарителя. Сопоставление данных проведено по средним температурам испарителя. Введение поправки на перегрев хладагента относительно температуры парообразования позволило уточнить разработанную физико-математическую модель, тем самым получить достаточно близкую сходимость расчетных и экспериментальных данных. Полученные результаты в основной своей массе не вызывают сомнений и являются достоверными.

**В четвертой главе** проведен сравнительный анализ функционирования систем ТСГ с горизонтальным испарителем, заправленных аммиаком и диоксидом углерода. Выбор этих хладагентов обусловлен их термодинамическими свойствами, а также технико-экономическими и экологическими точками зрения. Приведены результаты численного моделирования функционирования системы ТСГ с горизонтальным испарителем, расположенной в основании нефтяного резервуара для различных геокриологических условий Западной Сибири. По результатам прогноза температурного состояния массива грунтов получено, что при прочих равных условиях наиболее эффективным является система ТСГ, работающая на диоксиде углерода. Далее решена модельная задача по определению значений нижних и верхних критических тепловых нагрузок в зависимости от конструктивных решений и температурного режима конденсаторной части, при которых работа системы ТСГ будет стабильной. Детальный анализ тепловых нагрузок и температур испарителя показал, что использование диоксида углерода в системах ТСГ с горизонтальным испарителем является предпочтительным. Дана рекомендация по проектированию таких систем, выраженная в выборе оптимального расстояния между трубами испарительной части: диапазон рабочей тепловой нагрузки на испаритель системы ТСГ должен находиться в середине интервала между верхними и нижними критическими тепловыми нагрузками.

Основные выводы резюмированы в **заключении** диссертации.

В целом, диссертацию А.А. Ишкова можно квалифицировать как законченную научную работу, имеющую большое значение для развития науки и практики в соответствующей области. Научная новизна полученных результатов, обоснованность и достоверность сформулированных защищаемых положений обеспечены необходимой теоретической проработкой исследуемых проблем теплопереноса, использованием

апробированных вычислительных алгоритмов и соответствием расчетных данных результатам лабораторных экспериментов.

Но работа не лишена некоторых недостатков.

1. В работе фактически отсутствует анализ литературы по математическим моделям теплопереноса в талых (мерзлых) грунтах. Автор ограничился использованием приближения Стефана, в то время как для таких задач более оправданы модели с фазовыми переходами в интервале температур.

2. В постановке задачи Стефана (на стр. 32) коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость грунта описаны как величины, не зависящие от температуры. Но при конечно-разностной аппроксимации уравнения теплопроводности явной схемой задана зависимость коэффициента температуропроводности от температуры. Следовательно, не лишним было бы выполнение анализа существующих аппроксимаций разрывных функций при температуре фазового перехода «лёд - вода».

3. Основной недостаток метода Самарского-Моисеенко заключается в том, что точность решения зависит от выбора параметра сглаживания разрывных коэффициентов. Следовательно, необходимо пояснить значение параметра  $\Delta$ , принятого постоянным и равным  $0,1$  °C для талой и мерзлой зон.

4. При выводе основных уравнений разработанной физико-математической модели принятые упрощающие допущения вполне обоснованы. Но при современном уровне развития вычислительной техники, теории и практики научных вычислений не составляет проблем провести численное исследование рассматриваемой проблемы без использования упрощающих предположений. Сравнение с расчетами по полной модели дало бы, в частности, оценку используемым допущениям.

5. В списке значений для входных величин при решении задачи теплового взаимодействия грунтового основания нефтяного резервуара с окружающей средой отсутствуют среднемесячные значения суммарной солнечной радиации и альбедо дневной поверхности, которые также должны циклически изменяться с течением времени. При этом для рассмотренных 3 геокриологических зон без каких-либо пояснений игнорируется влияние начального распределения температур по глубине массива грунтов на динамику его температурного состояния.

Считаю, что отмеченные недостатки носят редакционный характер и существенно не влияют на общую положительную оценку работы, и направлены на дальнейшее развитие исследований в этом направлении.

Результаты диссертационной работы отражены в 18 научных работах, которые позволяют считать, что научная общественность имеет полную возможность оценить достижения соискателя. Основные из них опубликованы в 7 рецензируемых научных

