

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию Чжоу Бичэн «Напряженно-деформированное состояние промерзающих грунтов при миграции влаги», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.7.**

### **Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение**

Проблема миграции влаги в промерзающих грунтах является весьма актуальной для участков освоения территорий с сезонными и многолетнемерзлыми горными породами. Обильное льдовыделение на границе промерзания грунтов приводит к пучению фундаментов инженерных сооружений и их деформациям. Интенсивное освоение криолитозоны в России и Китае, строительство крупных линейных инженерных сооружений, железных- и автодорог, магистральных нефте- и газопроводов требуют усовершенствования методов прогнозирования несущей способности грунтов основания в целях расчета устойчивости этих сооружений. Таким образом, актуальность исследования не вызывает сомнений.

Целью диссертационной работы соискателя является установление закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) и льдонакопления в промерзающих грунтах с учетом влагопереноса. Для ее достижения были поставлены четыре задачи, сводящиеся к: 1. анализу существующих представлений о формировании НДС и льдонакопления в промерзающих грунтах с учетом влагопереноса, оценке возможности применения для этого уравнения Клайперона-Клаузиуса; 2. разработке одномерной численной модели гидротермического взаимодействия компонентов грунта при его промерзании без влияния внешней нагрузки; 3. выполнению эксперимента по промерзанию водонасыщенной глины и сравнению их результатов с результатами численного моделирования; 4. на основе эксперимента и численного моделирования детализации закономерности формирования порового давления воды, миграции влаги и НДС в промерзающих грунтах.

Результаты исследования получены лично автором, апробированы на трех международных конференциях и опубликованы в четырех рецензируемых научных изданиях. Работа состоит из 135 страниц текста, включающего 52 рисунка, 7 таблиц, структурирована в виде введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы и 1 приложения.

В диссертационном исследовании Чжоу Бичэна предложено соотношение между термодинамическими параметрами в промерзающих водонасыщенных глинистых грунтах для определения порового давления воды, на основе которого разработана численная модель влаго-массопереноса. Отличием этой модели от аналогов является совместный учет

теплопереноса, массопереноса, изменения порового давления и фазового равновесия. Предложенная модель пригодна для прогнозирования льдовыделения и морозного пучения грунтов разной степенью влагонасыщения.

Среди достоинств работы следует выделить глубокую проработку большого объема литературных данных, владение соискателя навыками численного моделирования, знаниями механики сплошных сред, умение анализировать полученную информацию, видеть перспективу исследования. Несмотря на это к диссертационной работе есть ряд замечаний, которые можно разделить на основные и редакционные.

Основные замечания:

1. В названии диссертационной работы фигурирует понятие «грунтов», подразумевая все их многообразие. Однако, эксперименты и математическое моделирование выполнены лишь для каолинитовой глины, что значительно сужает масштаб исследования, заявленный в названии.

2. Защищаемые положения (все три) оформлены в виде общих утверждений, без какой-либо конкретики. На мой взгляд, следовало бы указать суть, то новое, что было предложено в моделях, используемые параметры грунтов и т.д.

3. В научной новизне в пункте 3 указано, что предложенная и верифицированная модель пригодна для прогнозирования льдовыделения и морозного пучения грунтов как с полной, так и с неполной степенью влагоемкости. Однако, эксперименты и моделирование выполнены лишь для глинистых грунтов, а верификацию, по мнению соискателя, модель прошла лишь при малом влагонасыщении.

4. Структура диссертационной работы Чжоу Бичэна выбрана не совсем удачно, хотя существуют строгие правила по ее оформлению. В главах 2–4 отражены, как обзоры литературы на выведение численных моделей, так и методика исследования. Логичнее было бы разделить это все на соответствующие главы: обзор литературы поместить в главу 1, методическую часть работы вынести в одноименную главу и т.д.

5. Не совсем понятно, чем, по мнению автора диссертации, экспериментальные исследования в главе 3 отличаются от таких же экспериментов в главе 4. В целом это одна и та же верификация расчетных данных. Можно было бы вынести весь текст об экспериментальных исследованиях в отдельную главу.

6. В тексте диссертационной работы при обзоре литературы много ссылок на иностранных исследователей. Из 156 наименований лишь 11 русскоязычных. Складывается ощущение, что данной темой исследования диссертации в СССР и России не занимались. Тем

не менее, в автореферате перечислены фамилии отечественных ученых, исследовавших данную тематику, без указания ссылок.

Редакционные замечания:

1. Непонятна причина выноса в сноску ссылки на Положение о присуждении учёных степеней в МГУ, например, на странице 30 текста рукописи диссертации.

2. В главе 1 представлен рисунок 1.1 Карта сезонного промерзания на территории Китая (Geographic Remote Sensing Ecological Network Platform, 2025), однако содержание представленной карты скорее отражает распространение разных типов мерзлых пород: сезонных и многолетних.

3. Широко упоминается термин «мерзлота», который является, скорее, сленговым. В геокриологии принято использовать термины «многолетнемерзлые породы» или «сезонномерзлые породы».

4. Глава 1, исходя из названия, должна раскрывать актуальность и историю исследования «в России, Китае и других странах». После ознакомления с текстом этой главы складывается впечатление, что проблемы миграции влаги в промерзающих грунтах и их пучение актуальны лишь на территории Китая, приводятся ссылки лишь на китайских авторов.

5. В главе 2 в первом абзаце текста написано: «Учитываются ключевые аспекты: движущие силы миграции влаги, фазовые переходы «лед-вода» и др.». Так, как это постановка задачи, читателю важно понять «ключевые аспекты» математической модели, в связи с чем следовало бы все их раскрыть, нежели завуалировать словом «другое».

6. Стр. 31 второй абзац второе предложение: «... при применении уравнения Клайперона-Клаузиуса к мерзлым грунтам с более низкими температурами...». Непонятно, какие это температуры, и что является точкой отсчета.

7. На стр.34 на 9 строке написано: «3) пренебрегается влиянием физико-химических эффектов, включая молекулярные силы и размер частиц;». В предложении отсутствует подлежащее, что «пренебрегается»?

8. На стр. 45 в разделе «Сходство между ненасыщенными незамерзающими и насыщенными мерзлыми грунтами» второе и третье предложение имеют одно и то же смысловое значение.

9. На стр. 46 во втором абзаце указано: «Поры ненасыщенного немерзлого грунта содержат две фазы – воды и газа, а поры насыщенного мерзлого грунта содержат две фазы – воды и льда. Именно поэтому у них можно ожидать сходства в свойствах.». Непонятно, о каких свойствах идет речь, в чем сходство, в подходах к математическому моделированию?

10. На стр. 69 во втором абзаце вводится аббревиатура «Кривой водоудержания почвы» (SWCC), однако несколькими предложениями ниже появляется аббревиатура КВГ без ее расшифровки. Лишь на странице 93 таковая появляется «кривая водоудержания грунта». По правилам оформления научной работы необходимо расшифровывать аббревиатуру в моменте первого ее упоминания.

11. На стр. 73 ошибочно дана ссылка в тексте на рисунок 2.4.2. Содержанию, в контексте предложения, должна соответствовать ссылка на рисунок 2.4.1.

12. На стр. 75 излишним является рисунок 2.4.2, т. к. формулы, указанные в нем продублированы формулой 2.4.10 и текстом с пояснениями. По сути, это излишнее повторение, не несущее важной информационной нагрузки.

13. В выводах к Главе 2 в пункте 4. Указано: «... Сравнение с традиционной моделью Клайперона демонстрирует лучшую согласованность нашей формулы с экспериментальными данными.». Однако, в тексте Главы 2 приведены лишь постановка задачи и выводы формул для численного моделирования. Никаких экспериментальных данных и их обсуждения в Главе 2 не приводится. Этот вывод здесь ничем не обоснован.

14. В выводах к Главе 2 в пункте 6 указано: «На основе анализа уравнений фазового равновесия и эмпирической зависимости Сюя установлена корреляция между...». В тексте подраздела 2.4.1 Уравнение равновесия фазового перехода написано, что эмпирическая формула Сюй Сюэцзу «опирается на экспериментальные данные» с мерзлым грунтом, не сообщается каким. В предыдущих двух главах лишь вскользь упоминается, что испытуемым грунтом является глина, без каких-либо дополнительных характеристик (минеральный состав, влажность и т.д.). В связи с этим непонятно, на каком основании автор диссертационной работы использует «эмпирические зависимости Сюя» для проведения корреляционных связей.

15. В выводах к Главе 2 информация в пункте 8: «8. Параметры предложенной модели пучения определяются характеристиками образцов граничными условиями эксперимента и данными литературных источников.» излишне обобщена. По своей сути это важный вывод, который отвечает первому защищаемому положению. В связи с этим стоило бы перечислить эти параметры, указать характеристики образцов, граничные условия эксперимента. Совершенно неясно, что автор понимает под «данными литературных источников», как параметры предложенной модели могут определяться этими данными?

16. В Главе 3 на страницах 79-80 излишне добавлена актуальность исследования и обзор литературы, которые должны быть в главе 1.

17. На странице 80 подглава 3.1.1. начинается с предложения: «Поверхностная химическая энергия крупных частиц мала, и на поверхности крупных частиц остается очень мало пленочной воды.». О каких частицах идет речь? Ощущение, что это предложение вырвано из контекста. В следующем предложении речь идет об «этом грунте», каком именно, непонятно. Далее по тексту указано: «... когда диаметр частиц продолжает уменьшаться...» в результате чего, от каких до каких размеров, непонятно?

18. На странице 81 в последнем абзаце указано: «В области исследований морозного пучения большое влияние на содержание незамерзшей воды и миграцию воды в мерзлой грунте оказывают свойства грунта, а свойства грунта неотделимы от минерального состава.». О каких свойствах идет речь из текста, непонятно.

19. Графики на рисунке 3.1.6 на странице 87 недостаточно информативны. Не у всех кривых есть условные обозначения, на нижнем графике не читаются условные обозначения во встроеной картинке.

20. Вплоть до страницы 88, исходя из содержания текста, речь идет о проведении морфологического анализа зерен глины и об эксперименте с морозным пучением. Однако, во втором абзаце речь уже идет об эксперименте с одноосным сжатием. Зачем, для каких целей, непонятно?

21. С чем связан выбор граничных условий, особенно нагрузки в 100 кПа при проведении эксперимента с одноосным сжатием?

22. На странице 89 в конце первого абзаца написано: «Затем температура продолжает снижаться, приближаясь к 0°C, и этот пик мы считаем начальной температурой замерзания грунта. Его значение часто меньше 0». На сколько? Напрашивается детальный анализ графиков с результатами эксперимента. Далее, в следующем абзаце: «Когда температура насыщенной глины ниже температуры замерзания, часть поровой воды замерзнет и превратится в поровый лед; А между льдом и внешней поверхностью частиц грунта находится слой незамерзшей водной пленки». Какова же температура замерзания глины?

23. В таблице 3.2.1 на странице 92 в графе «Физический смысл» текст приведен не полностью. Почему представлены входные данные для моделирования только для второго образца? Для 1 и 3 моделирование не проводилось?

24. На странице 93 во втором абзаце указано: «При отсутствии экспериментальных данных допустимо использование значений, приведенных в научной литературе...». Из контекста непонятно, кем допустимо? На каком основании? На сколько физические свойства грунтов испытываемых автором диссертации и авторов, на которых он ссылается идентичны, не

освещено в тексте работы. Однако, в следующем абзаце приводится ссылка на работу (Ning, et al., 2012), из которой взяты гидравлические параметры материалов, приведенных в таблице 3.2.1 на странице 93. Возникает некий диссонанс, т.к. соискатель писал об изучении монтмориллонитовой и каолиновой глин, гранулометрический анализ образцов грунта в работе не приводится, а ссылается на автора статьи, где указаны пылеватая глина и другие типы грунтов. Насколько это релевантно, вопрос.

25. На странице 96 в последнем абзаце указано: «Рис. 3.2.3 демонстрирует сравнение экспериментальных и расчетных температурных данных на расстоянии 1,5 см от холодного конца». Однако, в действительности указанный рисунок отражает распределение температуры в образце грунта на разный период времени, сравнения никакого не видно. На рисунке недостаточно условных обозначений и детальности в названии.

26. На странице 97 указано: «Как видно из графика, в численном моделировании наблюдается расхождение между температурой в той же точке и в тот же момент времени, полученной экспериментально. Это может быть связано с начальным состоянием грунта. В эксперименте образец, вероятно, не достиг полного насыщения, и наличие газа в порах грунта привело к значительному снижению теплопроводности.». Напрашивается вопрос, почему в таком случае автор не повторил эксперимент, чтобы достичь требуемых кондиций в грунте? Ведь третья задача диссертационной работы была поставлена: «3. Провести эксперименты по промерзанию грунтов и оценить пригодность предложенной численной модели для прогноза льдовыделения и пучения;»

27. На рисунках 3.2.2 и 3.2.7 представлены не карты распределения, а скорее схемы или разрезы. Условные обозначения к рисунку 3.2.7 сложны к восприятию, особенно шкала температур, если это действительно она, обозначение ее не приведено.

28. На рисунке 3.2.8. в подписях к осям указано: «Объемная влажность незамерзшей воды». Получается тавтология, вероятно имелось в виду «количество незамерзшей воды»?

29. На странице 103 написано: «Снижение содержания незамерзшей воды в промерзшей зоне инициирует восходящую миграцию влаги. При допущении, что: 1) скелет грунта не подвержен деформациям;». Здесь непонятно, что имеет в виду автор, это допущение относится ко всему разрезу грунта или промерзающей и немерзлой зонам?

30. На странице 104 указано: «Кроме того, для водонасыщенного пылеватого суглинка существует однозначная зависимость  $\theta u(T)$ . Следовательно, расчетные значения  $\theta i$  и  $\theta u$  могут быть преобразованы в массовую влажность  $w$  по формуле:». На сколько подобное допущение справедливо для испытываемых автором глин?

31. На странице 105 написано: «Образцом для экспериментов послужила элювиальная палеогеновая каолиновая глина месторождения Глухов и др. (Украина, индекс eP1)». Это эксперимент, который был описан в тексте ранее с тремя образцами или совершенно другой, непонятно?

32. На странице 106 приведен рисунок 3.2.10, на котором представлены результаты моделирования и эксперимента. На рисунках видны расхождения расчетных и экспериментальных графиков, однако в тексте их причины не поясняются.

33. На странице 107 написано: «Морозное пучение мерзлых грунтов моделировалось с использованием модуля механики твердого тела программного комплекса». Непонятно, какого программного комплекса? Далее, указано: «Согласно литературным источникам (98), начальная льдистость для начала морозного пучения насыпного грунта принималась равной 2.7%, а для пылеватой глины - 0.3%». Во-первых, неверно оформлена ссылка на литературу, во-вторых, насколько эти допущения релевантны к исследуемым глинам?

34. На рисунке 3.2.15 на странице 113 подписи к рисункам и на графике не совпадают.

35. На странице 118 указано: «Как показано на рис. 4.1.2, нами была проведена экспериментальная верификация модели с использованием данных о поровом давлении воды из литературного источника (Zhang et al., 2022)». На рисунке не показана верификация, там изображена колба с грунтом и подключенными к ней датчиками.

36. На странице 120 написано: «Кроме того, результаты моделирования других циклов, за исключением первого цикла замораживания-оттаивания, не очень хороши. Это связано с тем, что...». Однако, страницей ниже, в выводах, об этом ничего не сказано.

37. Выводы, представленные в Заключение диссертационной работы в излишней мере сопоставляются с поставленными задачами, шесть против четырех соответственно.

Представленные в работе материалы и научные положения позволили диссертанту по-новому взглянуть на проблему моделирования напряженно-деформированного состояния промерзающих грунтов, представить преимущества и недостатки предложенной расчётной схемы. Все это свидетельствует о высоком профессиональном уровне диссертанта, об его умении ставить задачи и решать их с помощью современных методов исследований.

В работе есть шероховатости, редакционные пометки, неточности в формулировках. В целом они не влияют на качество работы.

Считаю, что диссертация «Напряженно-деформированное состояние промерзающих грунтов при миграции влаги» полностью соответствует критериям, установленным в пп. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), а ее автор Чжоу Бичэн заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение.



Гагарин Леонид Александрович,

кандидат геолого-минералогических наук (специальность 22.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение.», диплом ДКН № 202101), Исполняющий обязанности заведующего лабораторией подземных вод и геохимии криолитозоны, ведущий научный Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36. Тел. 8 (411) 239-08-33; e-mail: [gagarinla@mpi.ysn.ru](mailto:gagarinla@mpi.ysn.ru)

Я, Гагарин Леонид Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

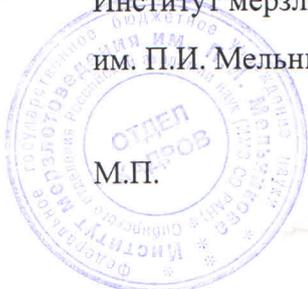


*Подпись Гагарина Леонида Александровича заверяю*

Начальник отдела кадров ФГБУН

Институт мерзлотоведения

им. П.И. Мельникова СО РАН



Л.Р. Степовая