

**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

**Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите**

Диссертационная работа Чжоу Бичэн посвящена исследованиям формирования напряжённо деформированного состояния и льдонакопления в промерзающих грунтах с учётом влагопереноса. Тема работы соответствует паспорту специальности 1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение, геолого-минералогические науки: по пункту 2 – Физические, физико-механические и физико-химические свойства грунтов, природа их деформируемости и прочности, корреляция между свойствами, классификационные и расчетные показатели свойств грунтов; по пункту 6 – Тепломассоперенос в грунтах, закономерности образования и существования в них льда, газовых и газогидратных компонентов.

**Актуальность работы**

При возведении инженерных сооружений в криолитозоне морозное пучение глинистых грунтов выступает основным фактором развития неравномерных деформаций оснований и возникновения аварийных ситуаций. Данное явление по своей природе представляет собой сложный процесс сопряженного термо-гидро-механического взаимодействия. Несмотря на более чем вековую историю экспериментально-теоретических исследований пучения грунтов, современный научный базис в значительной степени опирается на макроскопические закономерности влияния циклов замораживания-оттаивания на физико-механические свойства почвогрунтов, а также на эмпирические описания процессов льдовыделения. В то же время физико-механические теории, описывающие внутреннюю динамику пучения — в частности, механизмы порового давления — остаются недостаточно разработанными. В диссертационной работе с использованием методов численного моделирования и на основе глубокого

теоретического анализа термодинамических и гидравлических процессов разработана оригинальная физическая модель промерзания грунта. В работе системно раскрыта внутренняя логика взаимосвязи миграции влаги и эволюции порового давления. Выбранное направление исследования прецизионно отвечает актуальным запросам инженерной геологии в области долгосрочного мониторинга объектов инфраструктуры и анализа напряженно-деформированного состояния грунтов в холодных регионах. Таким образом, высокая степень актуальности и научная ценность данной темы не вызывают сомнений.

### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается проведением комплекса экспериментов с использованием современного оборудования и стандартных геокриологических методов, использованием в моделях фазовых переходов воды в лед при напряженно-деформированном состоянии классических уравнений термодинамики, сопоставлением экспериментальных результатов с соответствующими результатами численных моделей, достаточной апробацией основных научных положений публикациями в рецензируемых журналах и выступлениями на научных конференциях

### **Степень новизны результатов, полученных в диссертационной работе, и научных положений, выносимых на защиту**

Для определения порового давления воды в промерзающих водонасыщенных грунтах предложено использовать соотношение между основными термодинамическими параметрами, на основе которого разработана динамическая численная модель, прогнозирующая изменение давления во времени и по глубине как при наличии, так и при отсутствии формирования ледяных линз (шлиров).

Положительным элементом в разработанной численной модели гидротермического взаимодействия при промерзании грунтов является учет сопряженных процессов теплопереноса, массопереноса, изменения порового

давления и фазового равновесия, что выгодно отличается эту модель от существующих аналогов. Верификация этой модели показала, что она пригодна для прогнозирования льдовыделения и морозного пучения грунтов как с полной, так и с неполной степенью влагонасыщения.

### **Опубликованность результатов диссертации в научной печати**

Результаты работы получены автором самостоятельно, прошли апробацию на различных международных научно-практических конференциях и отражены в трех высокоуровневых научных статьях.

### **Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК**

Диссертационная работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация оформлена в полном соответствии с требованиями ВАК.

### **Краткая характеристика содержания диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 135 страниц машинописного текста, включает 52 рисунка, 7 таблиц и 1 приложение.

В диссертации представлен систематический обзор современных физических моделей морозного пучения, а также проведен глубокий теоретический анализ и ретроспектива базовых управляющих уравнений. Это обеспечило высокую степень логической строгости и научной обоснованности разработанной автором оригинальной модели. В ходе исследования автор продемонстрировал глубокую фундаментальную подготовку в области механики сплошных сред. Особо следует отметить введение параметра отношения объемного содержания льда к воде ( $\theta_w/\theta_i$ ) в качестве ключевого связующего звена. Это позволило эффективно решить проблему сопряжения четырех управляющих уравнений модели, описывающих теплоперенос, массоперенос, механические напряжения и фазовые переходы. Данная работа свидетельствует о наличии у автора зрелого научного мышления и системного академического кругозора. Автор в совершенстве владеет современными методами

инженерно-геологических исследований и демонстрирует квалификацию при решении сложных междисциплинарных задач.

В **первой главе** автором проведен детальный обзорный анализ различных физических моделей морозного пучения, охватывающий значительный объем ключевой отечественной и зарубежной литературы. Автор не только классифицировал модели по их способности прогнозировать закономерности льдовыделения, но и систематизировал недостатки существующих подходов. Замечание: Несмотря на широкий охват литературы, в данной главе недостаточно полно представлены классические модели и современные достижения российской геологической школы в области теории морозного пучения. Рекомендуется дополнить этот раздел для придания теоретической базе большей полноты.

**Вторая глава** является теоретическим фундаментом работы и отличается строгой логической структурой. Автор использует классические управляющие уравнения тепло- и массопереноса. В уравнение массопереноса введен коэффициент вязкости для моделирования препятствующего воздействия кристаллов льда на миграцию влаги. Следует отметить, что данный коэффициент носит отчасти эмпирический характер, что в определенных условиях может оказывать незначительное влияние на точность модели. Используя методы механики сплошных сред, автор провел сравнительный анализ ненасыщенных немерзлых и насыщенных мерзлых грунтов, на основе которого вывел математические зависимости между поровым давлением воды, параметрами эффективного напряжения, степенью насыщения и пористостью. Хотя в данном физическом анализе было допущено упрощение в виде игнорирования влияния связанной воды, полученные математические зависимости отличаются лаконичностью и существенно повышают эффективность построения сопряженной теоретической модели. Далее автором проведен глубокий обзорный анализ уравнения Клапейрона-Клаузиуса, что заложило прочный фундамент для применения принципа эффективных напряжений к данному уравнению. Полученное новое уравнение порового давления отличается от классической формы введением отношения объемного содержания влаги к объемному содержанию льда ( $\theta_w/\theta_i$ ). В завершение, путем математических преобразований уравнения фазового равновесия, автор

успешно установил функциональную зависимость между  $\theta_w/\theta_i$  и температурой. Это позволило эффективно упростить четыре неизвестные переменные модели (температура, льдистость, влажность, поровое давление) до двух независимых величин. Процесс анализа логически строг, а результаты обладают несомненной научной значимостью. Тем не менее, следует указать на допущенное в процессе теоретического упрощения игнорирование сложных физико-химических взаимодействий, таких как влияние связанной воды в глинистых грунтах.

**В третьей главе** автором проведены эксперименты по одностороннему промерзанию каолиновой глины. Выполнено сопоставление экспериментальных данных по температурному полю, полю влажности и деформациям пучения с результатами численного моделирования. Автор объективно проанализировал источники погрешностей и существующие недостатки модели.

**В четвертой главе** автором проведено численное моделирование на основе новейших китайских экспериментальных данных по циклам замораживания-оттаивания. Высокая точность модели при воспроизведении закономерностей изменения порового давления подтверждает эффективность и надежность разработанной оригинальной модели.

#### **Основные замечания по работе:**

1. В первую очередь необходимо обратить внимание на ограниченный перечень в списке используемых источников работ российских ученых, таких как Орлов Н. А., Чураев Н. В., Пермяков П. П., Гречищев С. Е., Чистотинов Л. В. и др.
2. Превышена роль уравнения Клапейрона-Клаузиуса в математическом описании движущих сил переноса влаги и возникновения гидростатического давления при промерзании грунтов. Это уравнение, безусловно, должно учитываться при наличии гидростатического давления в промерзающих грунтах. Однако в открытых системах при промерзании грунтов необходимо учитывать и другие термодинамические факторы.
3. При экспериментальном исследовании процессов переноса влаги и морозного пучения в исследуемых образцах желательнее определять функцию зависимости количества незамерзшей воды от температуры.

4. При оформлении диссертационной работы и автореферата допущены некоторые погрешности. Одной из таких существенных погрешностей является отсутствие указания размерностей параметров, фигурирующих в формулах.

5. Оценивая работу соискателя необходимо отметить, как и указывалось вначале данного отзыва, сложность проблем в области исследования процессов морозного пучения грунтов. Возможно, для решения всех проблем в указанной области потребуется не одна кандидатская и докторская диссертации. Поэтому хотелось бы отметить, что данная диссертация не снимает всех проблем в указанной области. В то же время кандидатская работа, прежде всего, является квалификационной работой, показывающей способность соискателя на достаточно высоком научном уровне проводить научные исследования. Дискуссии между различными школами не должны сказываться на уровне оценки кандидатской работы.

#### **Заключение по работе:**

Высказанные замечания не снижают общей высокой оценки исследования. Диссертация Чжоу Бичэн является законченным научным трудом, выполненным на высоком научно-техническом уровне. Автор продемонстрировал глубокие знания механики и термодинамики, успешно применив методы физического и численного моделирования. Научная новизна предложенной модели и её практическая значимость для криолитозоны имеют существенное значение для геотехники. Работа полностью отвечает критериям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней». Автор Чжоу Бичэн, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.7.

**Бровка Геннадий Петрович,**

Доктор технических наук

(специальность 25.00.36 - Геоэкология; 25.00.20 - Геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.),

профессор, главный научный сотрудник лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем Института природопользования НАН Беларуси.

Ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск

Тел. +375-17-272-43-21; e-mail: brovka\_gp@tut.by

Я, **Бровка Геннадий Петрович,** даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

26 февраля 2026 г.

Подпись(си) <i>Бровка Г.П.</i>
УДОСТОВЕРЯЮ
Ученый секретарь ГНУ Институт природопользования НАН Беларуси <i>Киш Калишечко Г.А.</i>
<i>26 февраля 2026</i>

