

Т Ю М Е Н С К И Й
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
Сибирского отделения РАН

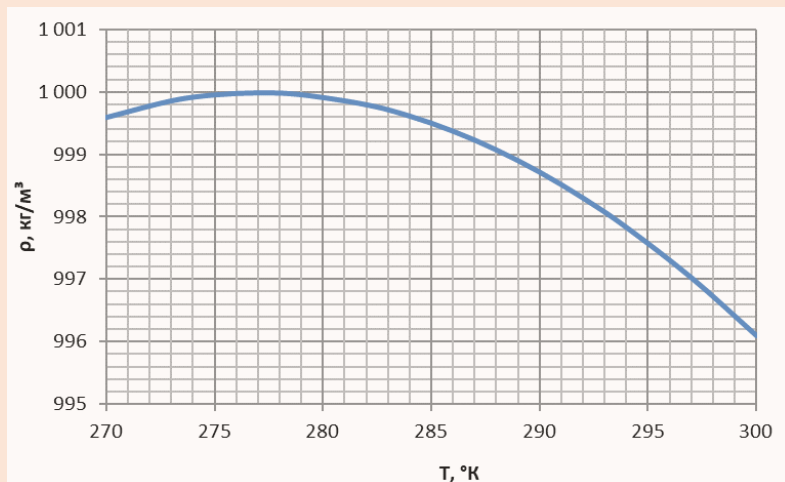


Международная конференция
XVI Забабахинские научные чтения

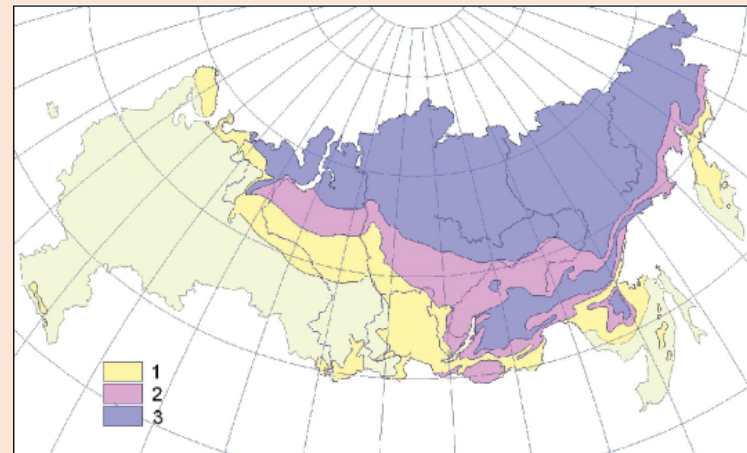
**ВЛИЯНИЕ МАКСИМУМА ПЛОТНОСТИ ВОДЫ НА ТЕМПЫ
ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД**

Олег Анатольевич Симонов,
Л. Н. Филимонова

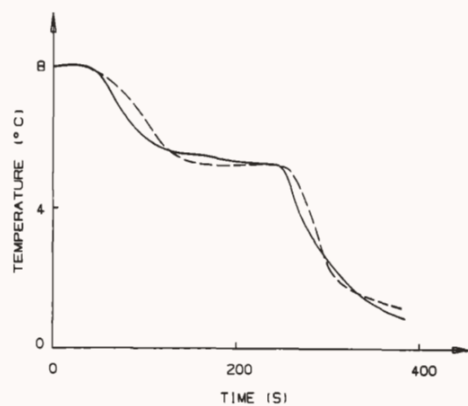
МАКСИМУМ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ
 $\rho = 999.972 \text{ кг/м}^3$ при $T = 3,984^\circ\text{C}$



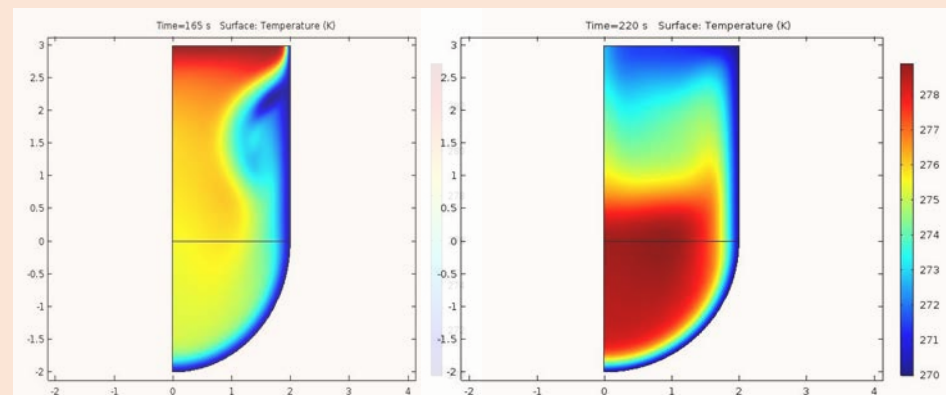
Проектирование, строительство,
эксплуатация зданий и сооружений
в районах вечной мерзлоты



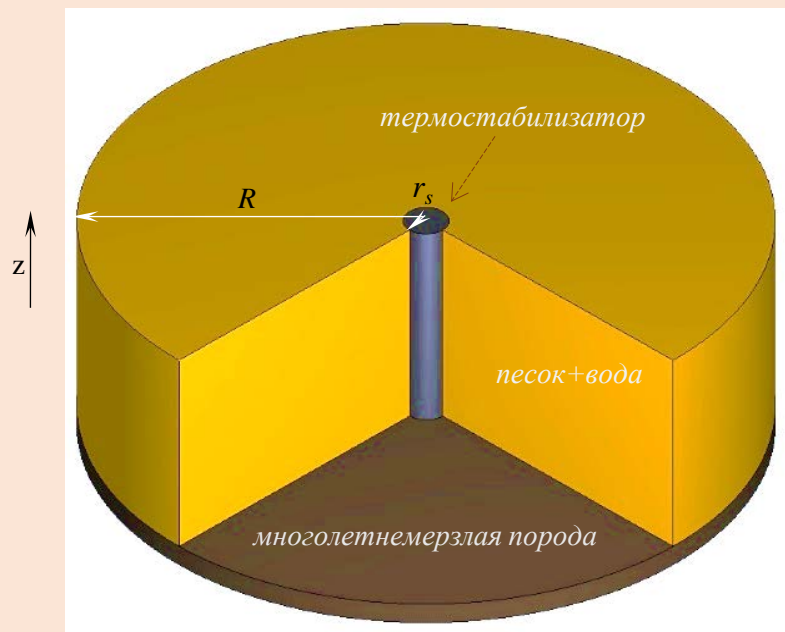
Явление инверсии плотности воды существенно влияет на свободные конвективные течения, что приводит к изменению структуры течения и оказывает существенное влияние на теплоперенос.



Изменение
температуры в
центре
цилиндрического
сосуда (Anselmi и
др., 1990)



Численное моделирование конвективного движения воды в пористой среде с учётом максимума плотности воды



$$\begin{aligned} R &= 0,2\text{м}, \\ h &= 0,1\text{м}, \\ r_s &= 0,01\text{м} \end{aligned}$$

система уравнений:

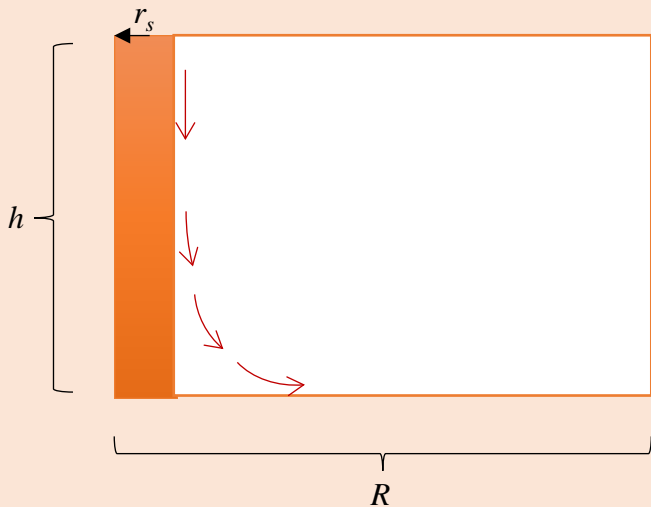
$$\begin{cases} \frac{\rho_w}{m} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p + \rho_w \vec{g} + \frac{\mu}{m} \Delta \vec{u} - \frac{\mu}{k} \vec{u} \\ \nabla \cdot \vec{u} = 0 \\ (\rho C)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + m \rho_w C_w \vec{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = 0 \end{cases}$$

начальные условия: $T(r, z, 0) = 283\text{K}; \vec{u}(r, z, 0) = 0$

граничные условия: $T(r_s, z, t) = 273\text{K}; \nabla \vec{u}(r_s, z, t) = 0$
 $\frac{\partial T(R, z, t)}{\partial r} = 0; \nabla \vec{u}(R, z, t) = 0$
 $\frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} = 0; \nabla \vec{u}(r, 0, t) = 0$
 $\frac{\partial T(r, h, t)}{\partial z} = 0; \nabla \vec{u}(r, h, t) = 0$

\vec{u} – скорость фильтрации (м/с); p – давление жидкости (Па); μ – динамическая вязкость жидкости (Па·с);
 λ – эффективный коэффициент теплопроводности (Дж/(м·с·°К)), $\lambda = m \lambda_w + (1 - m) \lambda_s$
 $\lambda_{w,s}$ – коэффициент теплопроводности воды и скелета (Дж/(м·с·°К));
 $(\rho C)_{ef} = m \rho_w C_w + (1 - m) \rho_s C_s$ – объёмная теплоёмкость насыщенной пористой среды (Дж/(м³·°К));
 $\rho_{w,s}$ – плотность воды и скелета (кг/м³); $C_{w,s}$ – удельная теплоёмкость воды и скелета (Дж/(кг·°К));

БЕЗРАЗМЕРНЫЙ ПАРАМЕТР – АНАЛОГ ЧИСЛА РЕЛЕЯ



$$\frac{\partial T}{\partial t} + m \frac{\rho_w C_w}{(\rho C)_{ef}} \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T - \chi \Delta T = \frac{\vec{q}}{(\rho C)_{ef}}$$

$$\frac{\lambda}{(\rho \cdot C)_{ef}} = \chi - \text{коэффициент теплопроводности (м}^2/\text{с)}$$

$$\alpha = \frac{\rho_w C_w m u_h h}{(\rho C)_{ef} \chi}$$

$$u_h = \frac{k \Delta P}{\mu h} = \frac{k(\rho - \rho_0) g h}{\mu h} = \frac{k g \rho - \rho_0}{\nu \rho_w}$$

$$\alpha = \frac{(\rho - \rho_0) C_w m k g h}{(\rho C)_{ef} \nu \chi}$$

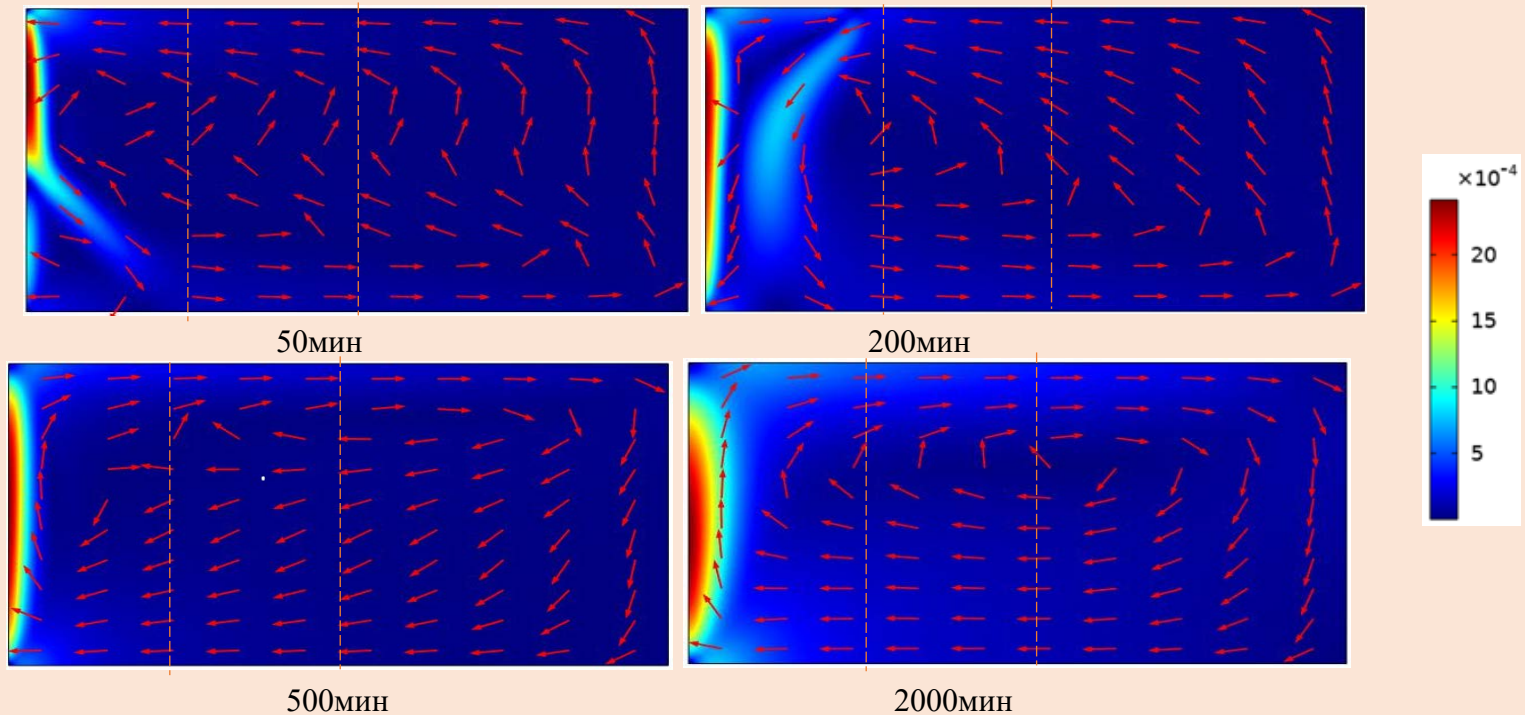
$\alpha \ll 1$ – кондуктивный перенос тепла;
 $\alpha \gg 1$ – конвективный перенос тепла;
 $\alpha \approx 1$ – переходный режим

В численном эксперименте:

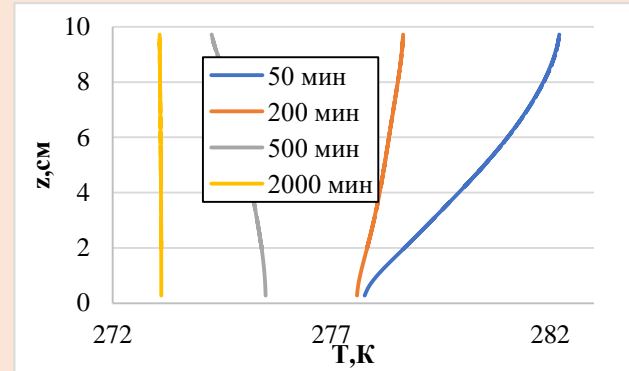
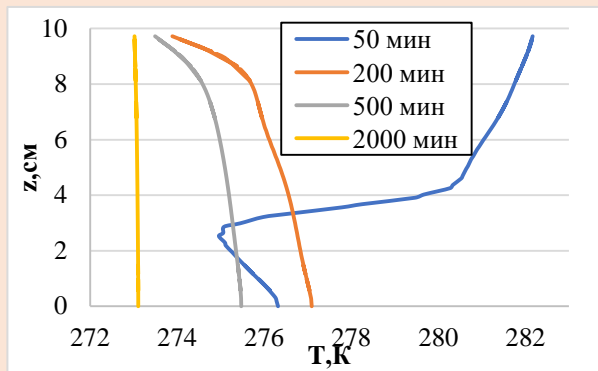
- $\alpha = 1248$ ($k=10^{-5} \text{ м}^2$);
- $\alpha = 12,48$ ($k=10^{-7} \text{ м}^2$);
- $\alpha = 0,0001248$ ($k=10^{-12} \text{ м}^2$);

КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВОДЫ ПРИ $\alpha \gg 1$

Поле скоростей течения при охлаждении пористой среды при $\alpha = 1248$ (проницаемость 10^{-5})
с учётом максимума плотности воды

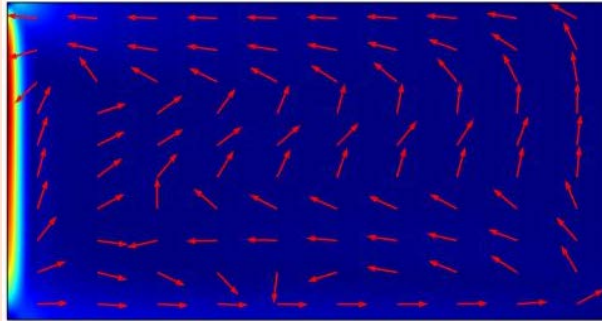


Зависимости температуры от высоты, рассчитанные для радиусов 0.025м и 0.05м для времен 50мин;
200мин; 500мин; 2000мин

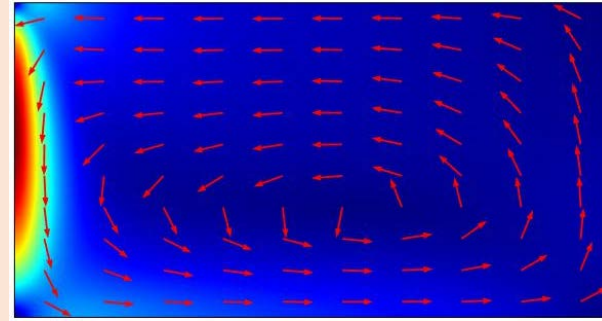


КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВОДЫ ПРИ $\alpha \gg 1$

Поле скоростей течения при охлаждении пористой среды при $\alpha = 1248$ (проницаемость 10^{-5})
без учёта максимума плотности воды

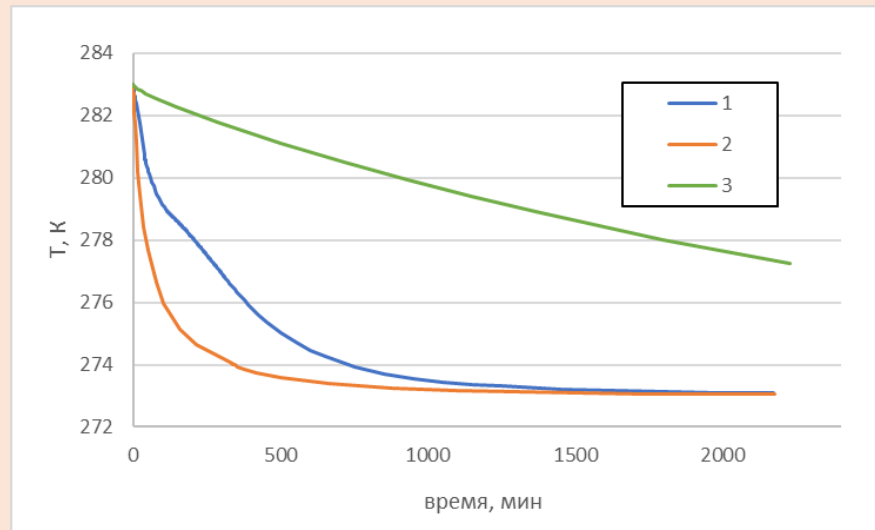


200мин



2000мин

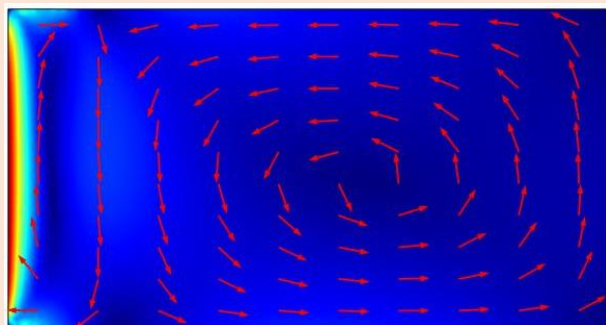
Зависимость средней температуры охлаждаемой пористой среды от времени при $\alpha = 1248$



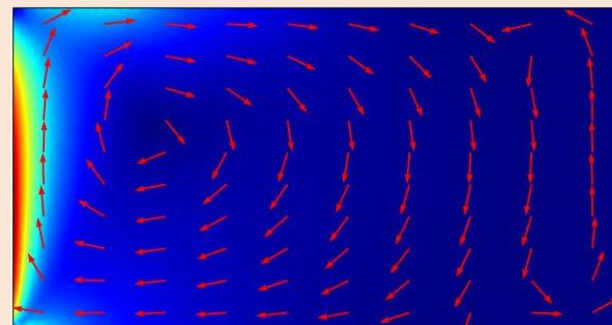
- 1 - максимум плотности воды учитывается (*синяя линия*),
- 2 - без учёта максимума плотности воды (*оранжевая линия*),
- 3 - без учёта конвективного движения (*зелёная линия*).

КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВОДЫ ПРИ $\alpha \approx 1$

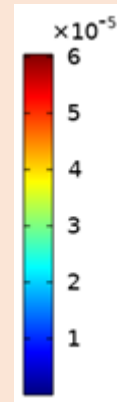
Поле скоростей течения при охлаждении пористой среды при $\alpha = 12,48$
(проницаемость 10^{-7}) с учётом максимума плотности воды



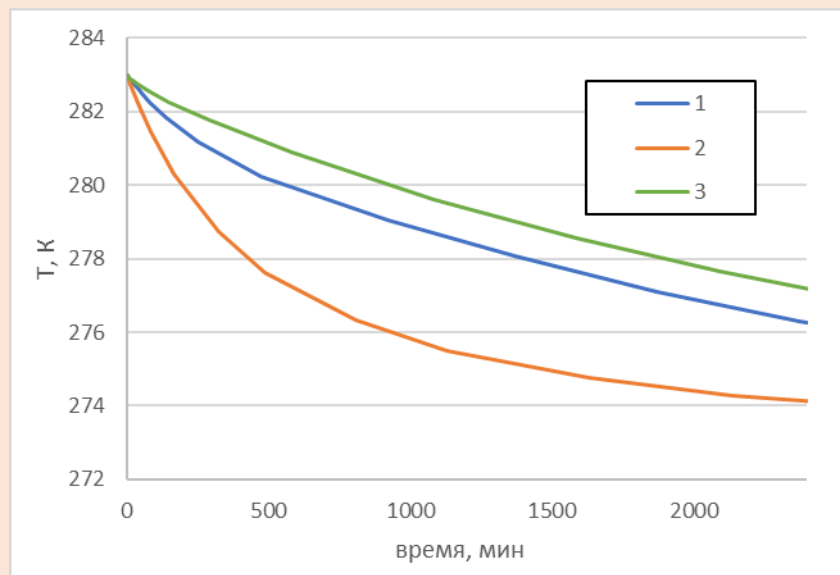
1000мин



2000мин



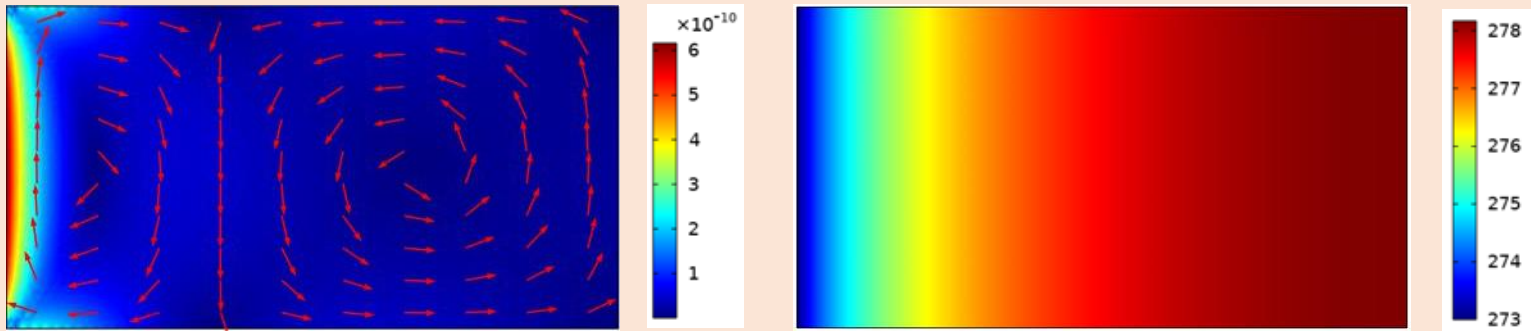
Зависимость средней температуры охлаждаемой пористой среды от времени при $\alpha = 12,48$



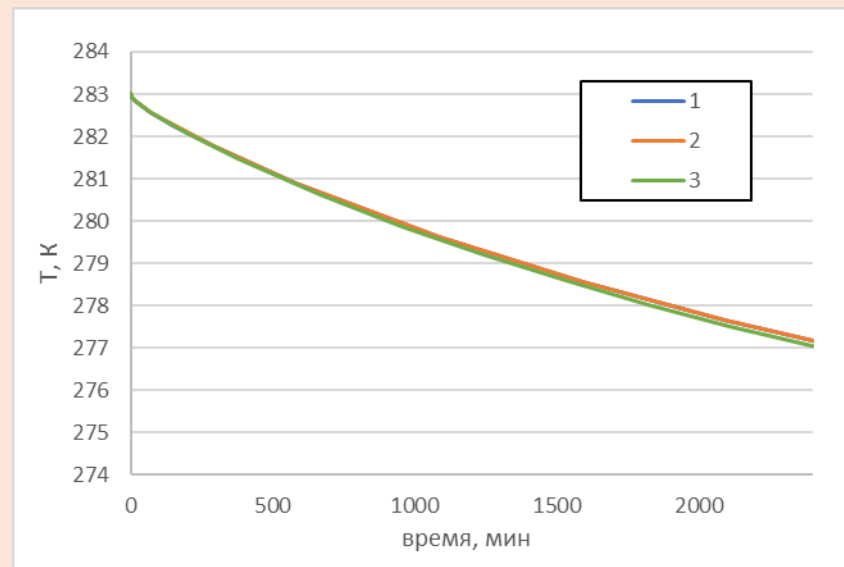
- 1 - максимум плотности воды учитывается (синяя линия),
- 2 - максимума плотности воды не учитывается (оранжевая линия),
- 3 - без учёта конвективного движения (зелёная линия).

КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВОДЫ ПРИ $\alpha \ll 1$

Поле скоростей течения и температуры при охлаждении пористой среды при $\alpha = 0,0001248$ (проницаемость 10^{-12}) с учётом максимума плотности воды в момент времени 2000мин

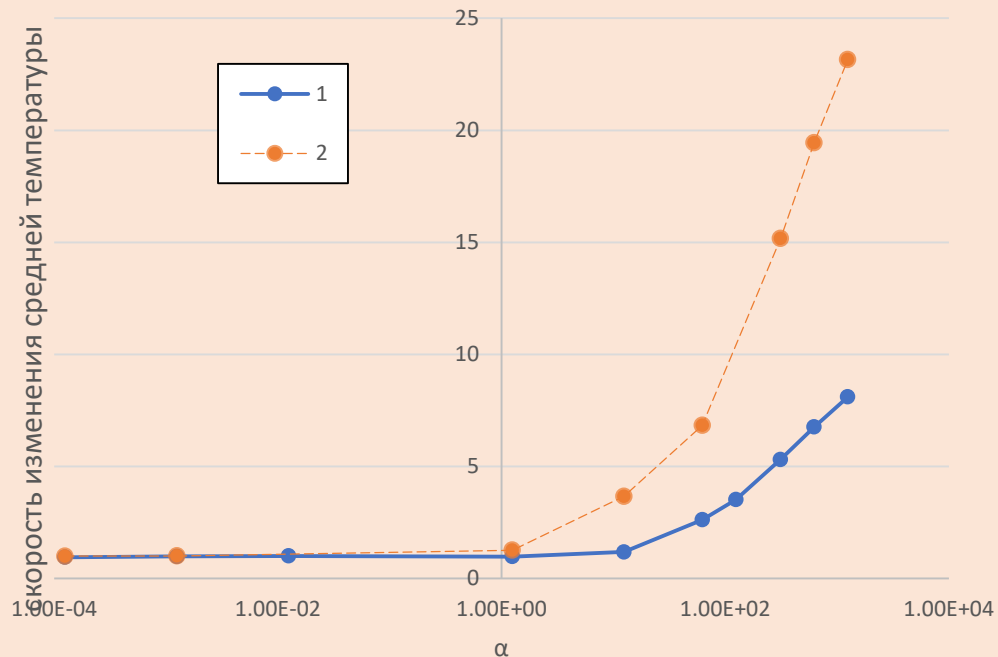


Зависимость средней температуры охлаждаемой пористой среды от времени при $\alpha = 0,0001248$



- 1 - максимум плотности воды учитывается (*синяя линия*),
- 2 - максимума плотности воды не учитывается (*оранжевая линия*),
- 3 - без учёта конвективного движения (*зелёная линия*).

Зависимость средней скорости охлаждения пористой среды от параметра α



1 – максимума плотности воды учитывается;
2 – максимум плотности воды не учитывается

$\alpha < 10 \Rightarrow$ возможно провести расчет без учета конвективных потоков;

$\alpha > 10 \Rightarrow$ необходим расчет с учетом конвекции и обязательным использованием модели воды учитывающей наличие максимума плотности.

ВЫВОДЫ

- Явление инверсии плотности воды существенным образом влияет на конвективный тепломассоперенос в высокопроницаемой пористой среде. Пренебрежение в расчетных моделях свободной конвекцией и наличием у воды максимума плотности приведут к существенным различиям расчетных и реальных теплофизических параметров.
- В расчетах, проведенных без учета наличия максимума плотности воды конвективный тепломассоперенос более интенсивен, что приводит к занижению времени охлаждения пористой среды.
- Необходимость учета в теплофизических расчетах конвективного тепломассопереноса в пористой среде определяется безразмерным параметром ($\alpha = \frac{(\rho - \rho_0) \cdot C_w \cdot m \cdot k \cdot g \cdot h}{(\rho \cdot C)_{ef} \cdot \nu \cdot \chi}$). Наличие у воды максимума плотности позволяет пренебречь в теплофизических расчетах свободной конвекцией при значениях $\alpha < 1$.

Спасибо за внимание!