

КОНВЕКЦИЯ ВОДЫ В ТЕЛЕ ПЛОТИНЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ

ДЖАМАНБАЕВ М.ДЖ., ЧЫНЫБАЕВ М.К.
КГТУ им. И.Раззакова
jamanbaev@mail.ru, chynybaev@gmail.com

В статье приводятся результаты численного моделирования свободного движения воды в теле плотины под действием градиента температуры.

In article results of numerical modeling of free movement of water in a ground under the influence of a temperature gradient are resulted.

Температурный режим тела плотины зависит от скорости инфильтрации и температуры воды в грунте. Фильтрующая вода, омывая грунт или полностью его, насыщая, влияет на процесс переноса тепла, т.е. заметно увеличивает эффективную теплопроводность грунта и тем самым способствует увеличению теплового потока извне в грунт. Поэтому достоверность результата расчета температурного режима зависит от постановки задачи, т.е. учитывается ли инфильтрация воды, насыщенность грунта или нет. Инфильтрация воды в грунт может быть от водоема, от водохранилища или от атмосферных осадков.

Постановка задачи. Рассматривается водонасыщенный однородный грунт в трапециевидальной области. Левая сторона трапеции соответствует температуре $+4^{\circ}\text{C}$. На верхней и правой границе поддерживается постоянная положительная температура $+20^{\circ}\text{C}$, на нижней границе постоянно температура 0°C . Начальная температура области равна 0°C . В процессе теплопередачи верхняя граница области грунта нагревается, а на нижней границе поддерживается нулевая температура, и из-за разницы температуры воды происходит свободная конвекция. Требуется определить поле температуры грунта и поле скоростей свободной конвекции воды в зависимости от влияния температуры на верхней и нижней границах области.

Математическая модель. Существуют различные математические модели, описывающие температурно-фильтрационный режим грунта. Если происходит просачивание воды в грунте под влиянием разности давлений или под действием собственного веса, то в таких случаях свободная конвекция отсутствует, и температурный режим воды и грунта описывается известными уравнениями теплопереноса и фильтрации [1]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \beta_v(Q - T);$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + v_y \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} + v_z \frac{\partial^2 Q}{\partial z^2} = \alpha^*(T - Q), \quad (1)$$

где $T(x,y,z,\tau)$ - температура грунта; $Q(x,y,z,\tau)$ - температура фильтрующей воды; τ – время; a_x, a_y, a_z – коэффициенты температуропроводности грунта, насыщенного водой, по осям; v_x, v_y, v_z – компоненты скорости фильтрации по осям;

$$\alpha^* = \frac{\alpha_v}{C_g \rho_g}; \beta_v = \frac{\alpha_v}{C_z \rho_z}$$

где α_v - объемный коэффициент теплообмена, характеризующий теплообмен между грунтом и омывающей его фильтрующей жидкостью; C_g, C_z – удельная объемная теплоемкость воды и грунта; ρ_g, ρ_z - плотности воды и грунта.

Система уравнений (1) описывает изменение температуры фильтрующей воды при прохождении через пористую проницаемую среду и ее отличие от температуры пористой среды. Теплообмен между водой и грунтом характеризуется параметром – коэффициентом объемного теплообмена. При длительном процессе теплопереноса температуру грунта и температуру

фильтрирующей воды можно считать равными. Тогда уравнения (1) упрощаются и сводятся к уравнению Фурье-Кирхгофа [1]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{c_z \gamma z}{c_{\epsilon} \gamma \epsilon} \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Если в начальный момент грунт полностью насыщен водой, фильтрация воды отсутствует и начинается нагрев грунта, то из-за разности температуры воды в грунте начинается свободная конвекция воды. Такой процесс описывается уравнениями Брикмана [2] и уравнением теплопереноса:

$$\frac{\mu}{k} u + \nabla_p - \nabla \cdot \frac{\mu}{s} (\nabla u + (\nabla u)^T) = \rho g \beta (T - T_c) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot u = 0.$$

Здесь T - представляет температуру грунта, T_c - исходная температура, g - ускорение силы тяжести, ρ - плотность жидкости при исходной температуре, m - пористость и β - коэффициент жидкости объемного теплового расширения.

$$\rho C_L u \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k_{eq} \nabla T) = 0, \quad (4)$$

где k_{eq} - обозначает эффективную теплопроводность жидко-твердой смеси,

C_L - теплоемкость жидкости при постоянном давлении. Как выше было упомянуто, при длительном процессе теплопереноса без изменения краевых условий, процесс становится установившимся и поэтому модель (3) – (4) описывает установившийся процесс теплопереноса.

Результат. Качественный анализ температурного режима грунта проведен на модельном примере с помощью вычислительного эксперимента. Рассмотрен водонасыщенный грунт с пористостью, равной 0.4; проницаемостью 0,001. Есть и численные значения теплофизических характеристик воды, как плотность, вязкость, коэффициент теплопроводности и объемного расширения. Расчеты проводились с помощью программы COMSOL в различных вариантах граничных условий, и результаты представлены отдельно для поля температуры, поля градиента температуры, поля скоростей жидкости в виде графика. Область автоматически разбивается на треугольные элементы, и (3) – (4) расчет ведется методом конечных элементов. Разбивка области на элементы представлены на рис.1. Результаты расчета модели (3) – (4) приведены на следующих рисунках. Поле температуры приведено на рис. 2.

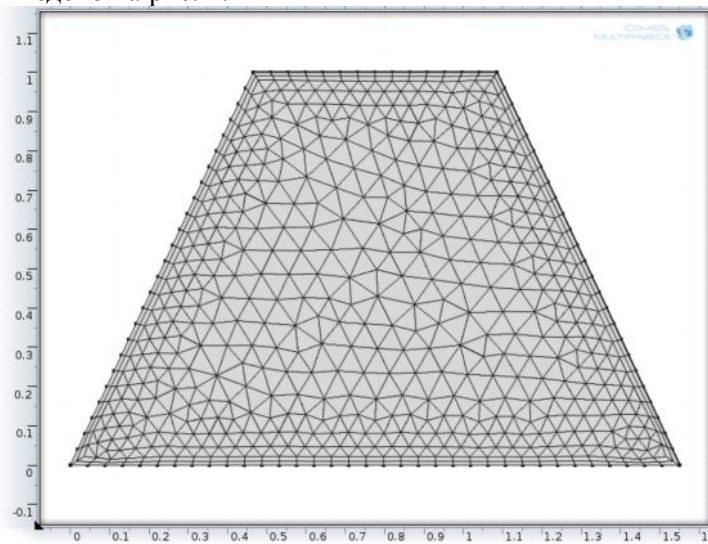


Рис. 1 Разбивка области на конечные элементы

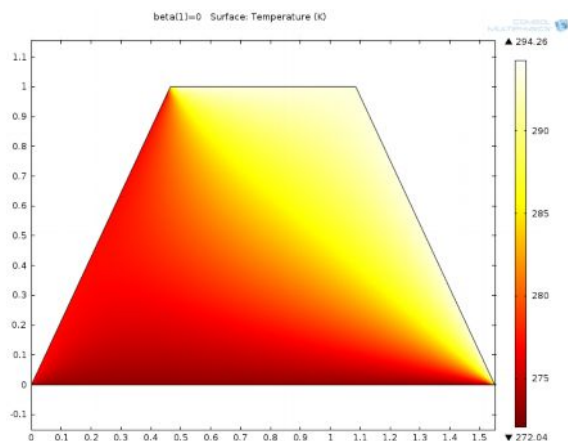
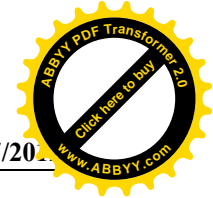
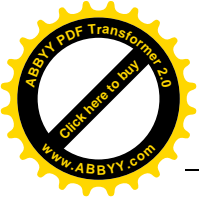


Рис. 2. Поле температуры.

Из результатов расчета, представленных на рис.2, следует, что положительная температура из верхней границы области распространилась почти до 70% области. Соответственно поле скоростей конвекции воды приведено на рис.3.

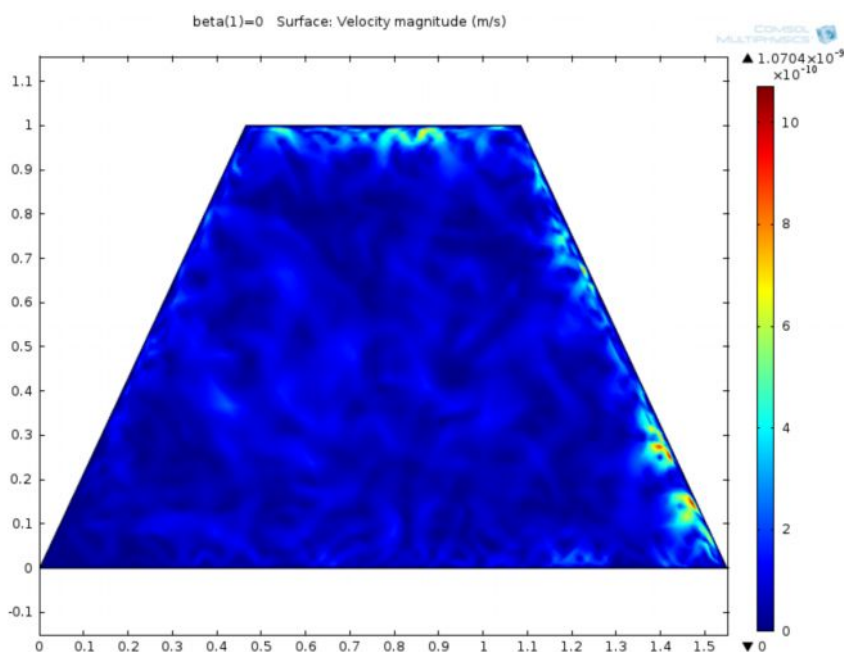


Рис.3. Поле скоростей конвекции воды.

Как видно из рис.3, движение происходит в основном в зоне влияния источника тепла.

Согласно полю градиентов, температуры на рис. 4 представлены в поле скоростей конвекции воды в грунте. Как видно из рисунка, результаты хорошо согласуются с физическим процессом.

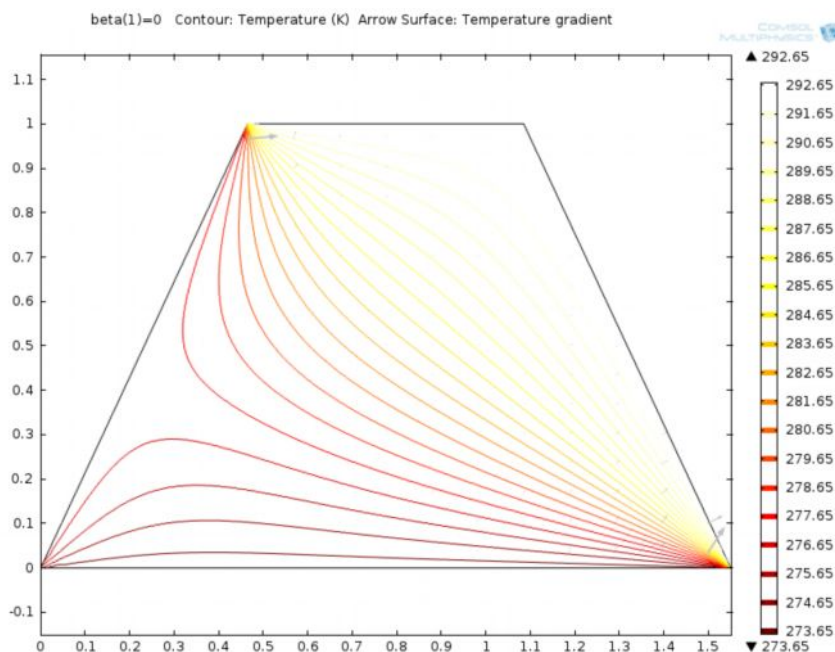


Рис.4. Градиенты температуры.

Выводы. Показано на основе математической модели (3)-(4), описывающей свободную конвекцию воды в грунте тела плотины под влиянием источника температуры, возможно, провести расчеты с помощью метода конечных элементов.

Литература

1. Анискин Н.А. Температурно-фильтрационный режим основания и плотины Курейской ГЭС во втором правобережном понижении. – М.: Вестник МГСУ 2/2006. С.43-52.
2. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. - М.: Гостоптехиздат, 1960. - 250 с. Free convection in Porious Media. Comsol. 2011