

Манжула И.С.

Дальневосточный юридический институт МВД России имени И.Ф. Шилова (г. Хабаровск)

Минаев В.А.,

доктор технических наук
Московский Ордена почета университет МВД России им. В.Я. Кикотя

Математическое моделирование и вычислительный эксперимент при создании наножидкостного солнечного коллектора для решения специальных задач энергообеспечения

Растущая потребность в устойчивых энергетических решениях обусловила повышенный интерес к солнечной энергии во всем мире. Особая потребность в надежных источниках, связанных с энергией Солнца, применительно к задачам, решаемым силовыми структурами страны, определяется необходимостью применения коллекторов прямого поглощения при проведении аварийно-спасительных работ (линия МЧС), использования таких коллекторов при осуществлении специальных операций правоохранительными структурами, а также воинскими подразделениями. Конечно же перспективы развития коллекторов прямого поглощения напрямую связаны с решением задач энергоснабжения в труднодоступных районах, которых в России насчитывается не менее 70-80%.

Однако пока эффективность традиционных солнечных тепловых коллекторов по-прежнему уступает конкурирующим технологиям, что стимулирует поиск путей их улучшения. Одним из перспективных направлений является применение наножидкостей – суспензий наночастиц в базовой жидкости – в качестве теплоносителя в коллекторах прямого поглощения (НКПП)¹. Такие системы совмещают поглощение солнечного излучения и его транспортировку, что потенциально повышает общую эффективность преобразования энергии².

Для оптимизации НКПП необходимы детальные исследования распределения солнечного излучения внутри рабочего объема и его зависимости от оптических свойств как базовой жидкости, так и наночастиц. Математическое моделирование позволяет эффективно анализировать эти процессы, сокращая затраты на экспериментальную отработку конструкций. В научной литературе уже предложены модели, учитывающие влияние объемной доли наночастиц,

¹ Tyagi H., et al. (2009). Enhanced specific absorption in nanofluid solar collectors. J. Sol. Energy Eng., 131(4), 041004.

² Mahian O., et al. (2019). Recent advances in modeling nanofluid flows. Int. J. Heat Mass Transf., 130, 1186-1223.

геометрии коллектора и условий течения на тепловую производительность¹. Вместе с тем, несмотря на активные исследования, промышленное внедрение НКПП сдерживается проблемами стабильности наножидкостей, их стоимости и недостаточной предсказуемостью характеристик в реальных условиях². В связи с этим численный анализ распределения интенсивности солнечного излучения в НКПП остается актуальной задачей, которой и посвящена настоящая работа. Ее целью является разработка математической модели в виде краевой задачи, описывающей процессы тепломассопереноса в наножидкостном солнечном коллекторе прямого поглощения при установившемся течении рабочей среды. Модель строится на основе численного моделирования внутренних физических процессов и учитывает температурную зависимость динамической вязкости наножидкости, что обеспечивает более точное воспроизведение ее реологического поведения в условиях нагрева.

Общее описание математической модели и методов исследования

Рассматривается плоский солнечный коллектор прямого поглощения, заполненный наножидкостью на основе этиленгликоля с диспергированными наночастицами алюминия. Выбор этиленгликоля в качестве базовой жидкости обусловлен его выраженной температурной зависимостью теплофизических свойств, в частности динамической вязкости, что позволяет более полно учесть нелинейные эффекты при моделировании тепломассопереноса³.

Математическая модель основана на уравнениях теплопроводности, стационарного уравнения Навье-Стокса и уравнения несжимаемости. Поглощение солнечного излучения наножидкостью описывается на основе закона Бугера-Ламберта-Бера, согласно которому ослабление интенсивности излучения определенной длины волны λ при прохождении через поглощающую среду моделируется обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка. Соответствующая задача формулируется как задача Коши, а суммарное значение величины интенсивности излучения вычисляется интегрированием по всему спектру излучения⁴.

Температурная зависимость динамической вязкости $\mu(T)$ задается посредством аппроксимации экспериментальных значений с применением метода наименьших квадратов, а также методов регрессионного и интерполяционного анализа.

¹ Gupta M., et al. (2023). Challenges of nanofluid-based solar collectors. *Renew. Energy*, 202, 1458-1475.

² Vargaftik N. B., et al. (1996). *Handbook of Thermal Conductivity of Liquids and Gases*. CRC Press.

³ Assael M. J., et al. (1996). *Thermophysical Properties of Fluids: An Introduction to their Prediction*. Imperial College Press.

⁴ Mahian O., et al. (2019). Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows. Part I. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 130, 1186-1223.

Граничные условия включают:

- заданную скорость на входе в коллектор;
- условия прилипания на твердых стенках;
- тепловые условия — заданный тепловой поток на верхней прозрачной границе (моделирующей поглощение солнечной радиации) и теплоизоляцию на остальных стенках, либо заданный коэффициент теплоотдачи при наличии внешнего охлаждения.

Такой подход позволяет корректно описать взаимосвязь между оптическим поглощением, гидродинамикой и теплопередачей в НКПП с учетом реологических особенностей наножидкости, что согласуется с результатами современных исследований подобных систем¹.

Результаты моделирования

Рассмотрим прямоугольную область $D = \{0 < x < L, \quad 0 < y < H\}$, где L и H – длина и высота солнечного коллектора (Рис. 1), причем $L \gg H$.

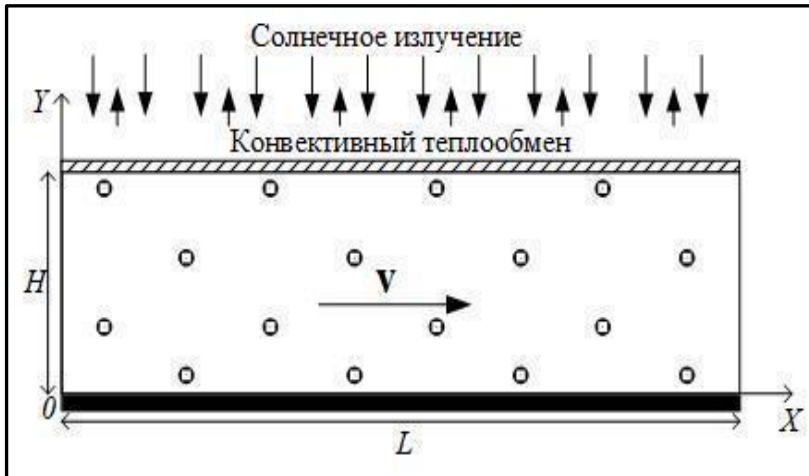


Рис. Упрощенная схема солнечного коллектора²

Рассмотрим задачу определения скорости $\mathbf{V} = (v, u)$ рабочей жидкости в тонком коллекторе, в основе которой лежат стационарное уравнение Навье-Стокса и уравнение несжимаемости, которые запишем в двумерной покомпонентной форме для вектора скорости в декартовой системе координат x, y .

Уравнение движения в проекции на ось Ox :

$$v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right). \quad (1)$$

Уравнение движения в проекции на ось Oy :

$$v \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right). \quad (2)$$

¹ He Y., et al. (2017). Numerical investigation on thermal performance of nanofluid-based direct absorption solar collectors. Appl. Therm. Eng., 113, 1217–1227.

² Составлен на основе: Tyagi H., et al. (2009). Enhanced specific absorption in nanofluid solar collectors. J. Sol. Energy Eng., 131(4), 041004.

Уравнения несжимаемости:

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

где $\mathbf{V} = (v, u)$ – скорость движения жидкости, p – давление, ρ – плотность жидкости, μ – кинематическая вязкость.

Граничные условия в соответствии с физической постановкой будут следующими:

$$\mathbf{V}|_{x=0} = \mathbf{V}_0, \quad \mathbf{V}|_{x=L} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x}, \quad y \in [0, H], \quad (4)$$

$$\mathbf{V}|_{y=0} = 0, \quad \mathbf{V}|_{y=H} = 0, \quad x \in [0, L], \quad (5)$$

где L и H – соответственно длина и ширина НКПП, $\mathbf{V}_0 = (v_0, 0)$, $v_0 = y(p_{in} - p_{out})(H - y)/2\mu L$ – аналитическое выражение для продольной скорости жидкости в солнечном коллекторе прямого поглощения.

Для однозначного определения давления используется соотношение

$$\int_D p(x) dx = 0. \quad (6)$$

С учетом выражений (1) – (6) далее формулируется дифференциальная задача, описывающая процессы теплопереноса в солнечном коллекторе прямого поглощения. Для указанной задачи строится конечно-разностная схема. Для упрощения изложения описание обозначений для сеточных функций и выражений, содержащих конечно-разностные производные, опустим, чтобы сосредоточиться на важных результатах, полученных в ходе модельных экспериментов.

В качестве базовой жидкости в экспериментах выбран этиленгликоль, что обусловлено термофизическими особенностями данного вещества. В частности, термофизические свойства этиленгликоля (включая плотность, динамическую вязкость, теплопроводность и теплоемкость) демонстрируют выраженную зависимость от температуры¹. Эта сильная температурная чувствительность делает этиленгликоль особенно подходящим кандидатом для численного моделирования процессов теплопереноса, поскольку позволяет выявить и количественно оценить влияние нестационарных и нелинейных эффектов на гидродинамическое и тепловое поведение системы².

¹ Assael M. J., et al. (1996). Thermophysical Properties of Fluids: An Introduction to their Prediction. Imperial College Press; Assael M.J., Trusler J.M. H., & Tsolakis T.F. (1996). Thermophysical Properties of Fluids: An Introduction to their Prediction. Imperial College Press.

² Свойства веществ : справочник / под ред. В.Ш. Эмануэля, Н.А. Изгарновой. М.: Химия, 2000. 672 с.

На основе справочной литературы¹ построены аппроксимационные выражения для определения таких теплофизических параметров этиленгликоля, как динамическая вязкость, плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность. Полученные зависимости обеспечивают погрешность не более 0.4% относительно реальных справочных данных.

В качестве материала наночастиц рассмотрены частицы алюминия. Теплофизические характеристики материала наночастиц выбраны из справочной литературы по оптическим константам и теплофизическим свойствам².

В работе построена математическая модель в виде краевой задачи для описания процессов тепломассопереноса в наножидкостном солнечном коллекторе прямого поглощения при установившемся течении. Модель интегрирует уравнения сохранения массы, импульса и энергии с учетом температурной зависимости динамической вязкости рабочей среды, а также спектрального поглощения солнечного излучения на основе закона Бугера-Ламберта-Бера. В качестве теплоносителя использована наножидкость на основе этиленгликоля с наночастицами алюминия, что обусловлено выраженной термозависимостью ее реологических свойств.

Результаты численных экспериментов показали, что учет температурной зависимости вязкости существенно влияет на гидродинамическую структуру потока: в зонах локального нагрева наблюдается снижение вязкости и, как следствие, увеличение скорости течения. Установлена тесная связь между температурным и скоростным полями. Это подчеркивает необходимость включения немонотонных теплофизических свойств в модели наножидкостных солнечных коллекторов для достижения высокой точности прогнозирования их тепловой эффективности.

Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований, включая использование гибридных наножидкостей с комбинированным составом наночастиц, что может позволить дополнительно оптимизировать оптические и реологические характеристики теплоносителя и повысить общую производительность систем солнечной энергетики, в частности используемых при решении задач, решаемых силовыми структурами страны, проведении аварийно-спасательных работ, осуществлении специальных операций правоохранительными структурами, а также воинскими подразделениями.

¹ Марчук Г.И. Методы расщепления. М.: Наука, 1980. 488 с.

² Assael M.J. et al. (1996). Thermophysical Properties of Fluids: An Introduction to their Prediction. Imperial College Press; Sheikholeslami M., Farshad S.A., Ebrahimpour Z., Said Z. Recent progress on flat plate solar collectors and photovoltaic systems in the presence of nanofluid: A review // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 293. P. 126119.