

УДК 536.7

Численное исследования хранения тепловой энергии с слоем уплотнением

Сейтов А.^{1,2}, Аманжолов Т.Е.², Тунгатарова М.С.^{1,2}, Толеуханов А.^{1,2}, Калтаев А.^{1,2}Satbayev University, Алматы, Казахстан¹, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан²

Из-за сложности потока жидкости и теплообмена в системах хранения тепла многие предыдущие гипотезы были введены в предыдущие модели слоем неупорядоченным уплотнением, что, следовательно, повлияло на точность и достоверность численного расчета. Поэтому была разработана эффективная модель с слоем неупорядоченным уплотнением, которая могла бы исследовать поток по мере того, как жидкость течет через пустоты материала, и в то же время могла бы учитывать температурные градиенты внутри сфер. Предложенная модель с уплотненным слоем была подтверждена экспериментально и, как оказалось, точно описывает тепловые явления при накоплении и извлечении тепла.

Ключевые слова: хранения тепла, возобновляемая энергетика, хранения тепловой энергии, хранения с слоем неупорядоченным уплотнением

1. Введение

Ожидается, что переменные возобновляемые источники энергии, такие как ветер и солнечная энергия, будут играть ключевую роль в борьбе с истощением запасов ископаемого топлива и изменением климата. С учетом взаимосвязи и реагирования спроса хранение энергии является одним из наиболее многообещающих способов повышения проникновения прерывистых источников энергии в электросети при обеспечении безопасности электроэнергии [1]. Интеграция системы аккумулирования энергии в электростанцию позволяет оператору избегать частых пусков и выключений электрического устройства, а также увеличивать коэффициент нагрузки путем диспетчеризации производства в соответствии со спросом и текущей ценой на электроэнергию. Таким образом, это способ снизить уровень затрат на электроэнергию, что делает переменные возобновляемые источники более конкурентоспособными [2]. В больших масштабах хранение тепловой энергии (ХТЭ) дешевле и эффективнее, чем большинство систем хранения электроэнергии [3].

Существует в основном три способа хранения тепла: накопление ощутимого тепла, накопление скрытого тепла и накопление химического тепла. Технологии скрытого и химического аккумулирования тепла, хотя и перспективные с точки зрения производительности, еще не являются коммерчески зрелыми. Скрытое аккумулирование тепла для ХТЭ все еще находится на стадии прототипа, в то время как химическое аккумулирование тепла все еще находится на стадии подтверждения концепции. В настоящее время на установках ХТЭ широко используется только разумное накопление тепла [4].

Самая распространенная и современная технология ХТЭ - это хранилище расплавленной соли с двумя резервуарами. Оно состоит в использовании солей расплавленного нитрата, которые имеют высокую объемную теплоемкость и высокую производительность. температура, как среда для хранения. В периоды загрузки холодная расплавленная соль нагревается в солнечных рецепторах и переносится из холодной в

горячую емкость. Процесс инвертируется для восстановления тепла и запуска тепловых процессов. Эта технология хорошо известна, проста в обращении и очень эффективна, поскольку горячие и холодные жидкости хорошо разделены [4]. Однако эта система хранения является относительно дорогой и требует огромного количества дорогостоящей нитратной соли, в то время как мировое производство природных нитратов ограничено и не сможет удовлетворить растущий спрос.

Чтобы справиться с этими трудностями, возможной альтернативой для разумного ХТЭ является хранение в одном резервуаре с слоем неупорядоченным уплотнением (СНУ), которое заключается в использовании твердых веществ в качестве среды для аккумуляции тепла и теплоносителя (ТН) в прямом контакте с твердыми веществами для передачи тепла. Как показано на рис. 2, в отличие от системы с двумя резервуарами для хранения с СНУ требуется один резервуар, в котором горячие и холодные зоны разделены переходной зоной с температурным градиентом, называемым «термоклин». Для фиксированной теоретической энергетической емкости хранилища жидкости / твердого в одном резервуаре имеет почти тот же размер, что и один из резервуаров системы с двумя резервуарами. Следовательно, для типичных наполнителей (например, горных пород с расплавленными солями или термальной нефтью) теоретическая плотность энергии хранилища с слоем с неупорядоченным СНУ с точки зрения объема резервуара примерно на 50% выше, чем у хранилища с двумя резервуарами, более того, используя дешевые СНУ, такие как камни и песок, можно сократить количество дорогой жидкости примерно на 70% [5].

Как следствие, общие инвестиционные затраты на хранение в СНУ снижаются на 35% по сравнению с хранением в двух резервуарах. Кроме того, учитывая, что жидкость в основном используется в качестве теплоносителя, а не в качестве накопителя, выбор жидкости более гибок. Поэтому возможно использование большего разнообразия жидкостей, как жидких, так и газообразных.

Однако, несмотря на то, что многие системы хранения с двумя резервуарами были внедрены и испытаны, до настоящего времени в больших масштабах была испытана только пара систем хранения с СНУ.

В этой статье рассматриваются корреляции для определения основных физических параметров, связанных с эксплуатацией, и моделирования хранилища с СНУ.

2. Численные модели для хранения с СНУ

Разработка числового инструмента, который полностью описывает явления теплопередачи и переноса в устройствах ХТЭ с СНУ (рисунок - 1), является сложной и дорогостоящей в вычислительном отношении из-за сильно связанной и нелинейной физики. Чтобы значительно уменьшить сложность численного анализа, было разработано несколько математических моделей, основанных на ряде предположений. Модели подразделяются на две основные категории: однофазная модель и двухфазная модель. Обе модели рассматривают СНУ как непрерывную пористую среду, но не как среду, состоящую из независимых и отдельных сфер. Следующие предположения принимаются во внимание при формулировании обеих моделей:

- геометрия хранилища цилиндрическая
- тепловые свойства как ТН, так и твердых частиц не зависят от температуры
- нет рассеивания тепловой энергии внутри СНУ
- нет источника тепла / поколения в постели
- нет химической реакции как в потоке, так и в слое
- радиационная передача тепла игнорируется

- термический градиент не учитывается в твердых частицах, за исключением модели концентрической дисперсии
- Однородные условия потока ТН на входе и выходе учитываются только потому, что модель не может учитывать случаи с одинарным или множеством конструкций трубок на входе и выходе.

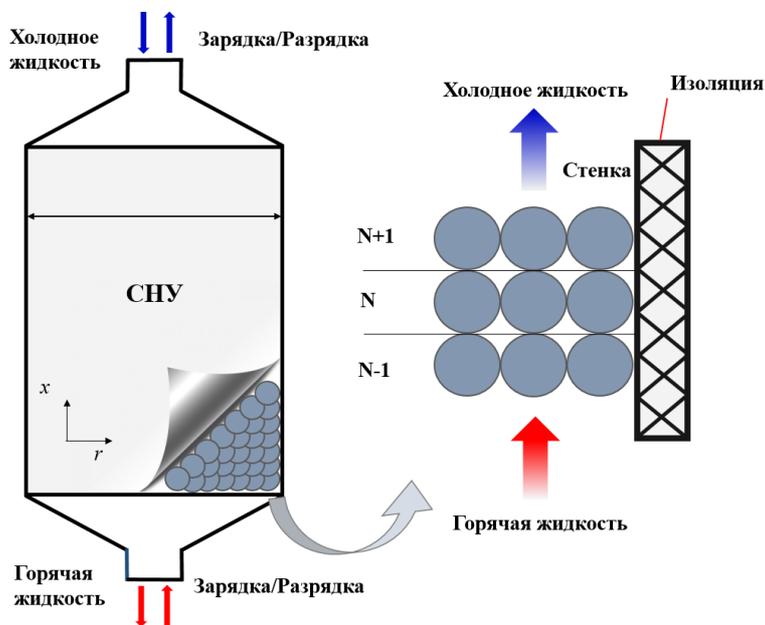


Рис. 1. Схема СНУ системы ХТЭ

2.1 Однофазные модели

Когда применяется однофазная модель, предполагается, что твердые материалы обладают высокой проводимостью, а тепловое сопротивление между СНУ и ТН незначительно. Следовательно, мгновенная температура T_{bed} твердой и жидкой фаз в любом конкретном месте может рассматриваться как равная, и определяющее уравнение задается как [6]:

$$\left(\varepsilon\rho_f c_f + (1 - \varepsilon)\rho_s c_s\right) \frac{\partial T_{bed}}{\partial t} + G c_f \frac{\partial T_{bed}}{\partial x} = k_{ef,x} \frac{\partial^2 T_{bed}}{\partial x^2} + k_{ef,r} \left(\frac{\partial^2 T_{bed}}{\partial r^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial T_{bed}}{\partial r}\right) \quad (1)$$

где ε – пористость СНУ, ρ (кг/м³) и c (Дж/кг К) – соответственно плотность и теплоемкость твердого и жидкого компонентов, G – массовый расход (кг/с м²) k_{porous} – эффективная теплопроводность слоя (Вт/мК), которая является функцией теплопроводности твердой и жидкой фаз, а $T_{bed}(x, r, t)$ – реходная температура СНУ. Уравнение (1) указывает на то, что конвективный теплообмен через пористый слой является доминирующим только в осевом направлении, в то время как проводящий теплообмен имеет место как в осевом, так и в радиальном направлениях. Единственной неизвестной переменной в уравнении (1) является $T_{bed}(x, r, t)$, поэтому она может быть численно смоделирована с соответствующими начальными условиями, а также граничными условиями для координат x и r , как показано на рисунке 2. Первоначально в упакованном слое предполагается равномерная температура как при зарядке, так и при разрядке:

$$T_{bed}(x, r, t) = T_0 \text{ for } t = t_0$$

Температура кровати на входном участке может быть записана как:

$$T_{bed} = T_{in} \text{ for } x = 0, 0 \leq r \leq r_{wall}, t > t_0$$

где $T_{in} > T_0$ в случае зарядки или $T_{in} < T_0$ в случае разрядки. На выходном участке слоя граничным условием является граничное условие типа Неймана (отток):

$$\frac{\partial T_{bed}}{\partial x} = 0 \text{ for } x = H, 0 \leq r \leq r_{wall}$$

На линии симметрии числовой области граничные условия вдоль x можно рассматривать как:

$$\frac{\partial T_{bed}}{\partial r} = 0 \text{ for } r = 0, 0 \leq x \leq H$$

Граничное условие на стенке резервуара для хранения основано на сохранении энергии между СНУ и окружающей средой:

$$-k_{ef,r} \frac{\partial T_{bed}}{\partial r} = U_{wall}(T_{amb} - T_{bed}) \text{ for } r = r_0, 0 \leq x \leq H$$

где U_{wall} - общий коэффициент теплопередачи между СНУ и окружающей средой.

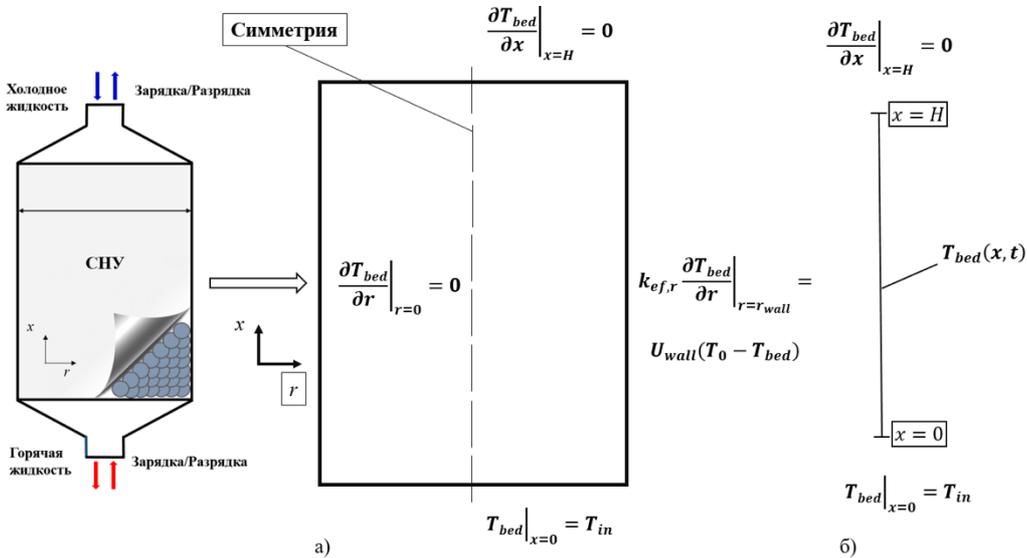


Рис. 2. Иллюстрация граничных условий для однофазной модели с пренебрежением радиальной теплопроводностью

Игнорируя радиальную теплопроводность в слое, уравнение (1) можно привести к одномерной модели:

$$(\epsilon \rho_f c_f + (1 - \epsilon) \rho_s c_s) \frac{\partial T_{bed}}{\partial t} + G c_f \frac{\partial T_{bed}}{\partial x} = k_{ef,x} \frac{\partial^2 T_{bed}}{\partial x^2} - U_{wall} a_{wall} (T_{bed} - T_{amb}) \quad (2)$$

где теперь $T_{bed}(x, t)$ является функцией осевой координаты и времени (рисунок). Следовательно, конвекция и диффузия тепла происходят только в осевом направлении, как видно из уравнения (2). Последний член в правой части уравнения (2) представляет собой потерю тепла через стенку емкости для хранения, где общий коэффициент теплопередачи U_{wall} может включать в себя тепловое сопротивление одиночной или многослойной изоляции, а также окружающая и a_{wall} - площадь поверхности единицы хранения на единицу объема кровати.

Начальные условия в этом случае такие же, как для уравнения (2), но существуют только два граничных условия на входном и выходном участках СНУ (рис. 2). Поскольку уравнение (2) предполагает, что распространение тепла незначительно в радиальном направлении, граничные условия на линии симметрии и стенке СНУ не рассматриваются.

2.2 Двухфазная модель: непрерывная твердофазная модель

В современной модели частицы СНУ рассматриваются как непрерывная пористая матрица, через которую происходит поток теплоносителя. Поскольку твердые и жидкие фазы рассматриваются отдельно, уравнения энергии также пишутся для каждой фазы [6]:

$$\varepsilon \rho_f c_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = k_{f,x} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + k_{f,r} \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + h_{f/p} a_p (\theta - T_f) \quad (3)$$

$$(1 - \varepsilon) \rho_s c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = k_{s,x} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + k_{s,r} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + h_{f/p} a_p (T_f - \theta) \quad (4)$$

где $T_f(x, r, t)$ - температура теплоносителя, $k_{f,x}$ - эффективная радиальная теплопроводность жидкости, $k_{f,r}$ - эффективная осевая теплопроводность жидкости, $h_{f/p}$ - коэффициент теплообмена между жидкостью и частицей, a_p - площадь поверхности внешней частицы на единицу объема слоя, $\theta(x, r, t)$ - температура твердого тела, ρ_s - плотность твердого тела, c_s - теплоемкость solid, $k_{s,x}$ - эффективная радиальная теплопроводность твердого тела, а $k_{f,r}$ - эффективная осевая теплопроводность твердого тела. Согласно уравнению (3) конвекция теплоносителя осуществляется в осевом направлении только при теплопроводности как в осевом, так и в радиальном направлениях из-за разницы температур между жидкостью и твердой средой. Хотя уравнение энергии (4) для твердой среды утверждает, что теплообмен переносится только в проводящей форме по осевым и радиальным координатам.

$$\varepsilon \rho_f c_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = k_{f,x} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + h_{f/p} a_p (\theta - T_f) - U_{wall} a_{wall} (T_f - T_{amb}) \quad (5)$$

$$(1 - \varepsilon) \rho_s c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = k_{s,x} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + h_{f/p} a_p (T_f - \theta) \quad (6)$$

2.3 2D численный модель

Из предыдущего раздела очевидно, что в одномерных моделях предполагается, что СНУ представляет собой пористую сплошную матрицу, а транспорт теплоносителя рассматривается как поток через пористую среду. Следовательно, обтекание частиц СНУ, в частности внезапное расширение или сжатие поля потока между частицами, не может быть учтено в одномерных моделях, поскольку в нем учитываются средние

скорости потока вдоль проходов потока в СНУ. Кроме того, используя одномерные модели, невозможно изучить несимметричный теплообмен между частицами СНУ и обтеканием их. Среди одномерных моделей только модель концентрической дисперсии учитывает температурные градиенты в твердых частицах, но только в радиальном направлении. Хотя в действительности это не так, потому что температурный градиент обычно неоднороден не только в радиальном, но и в круговом или угловом направлениях.

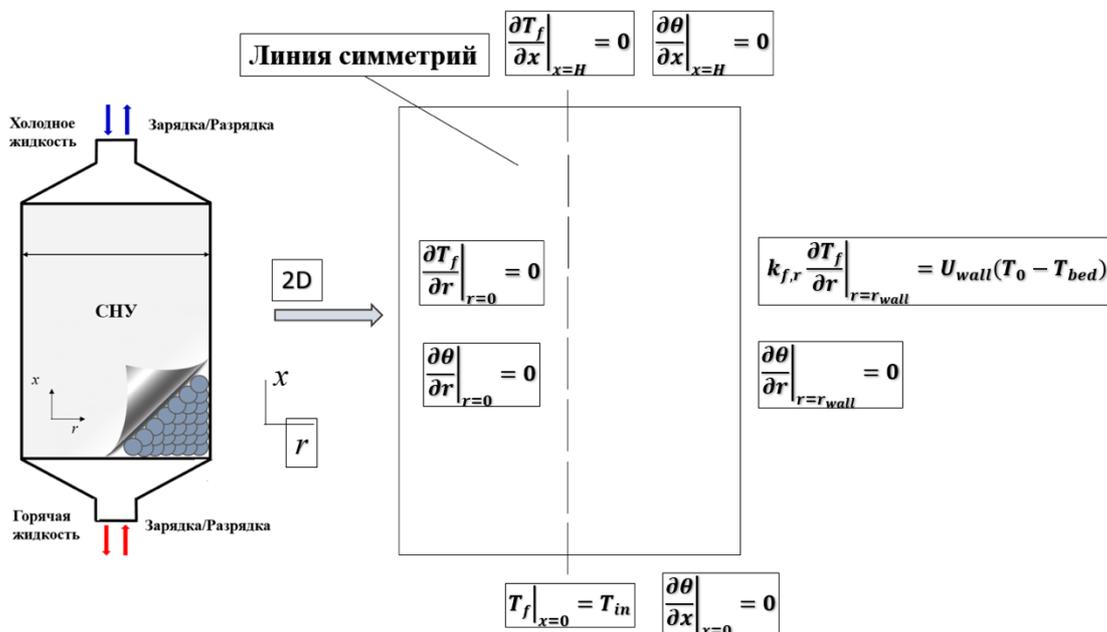


Рис. 3. Граничные условия для двумерной непрерывной твердофазной модели

Кроме того, точность численных результатов, полученных с помощью одномерных моделей, в значительной степени зависит от таких параметров, как эффективная теплопроводность пористой среды и общий коэффициент теплопередачи между жидкостью теплопередачи и частицами. Эти параметры рассчитываются на основе экспериментальных корреляций, которые могут быть точными для упакованных слоев с определенными конфигурациями, указанными в экспериментах, но, как правило, не подходят для любого типа конструкции хранилища с СНУ. Эти проблемы, связанные с параметрической точностью и приближениями пористой среды, могут быть уменьшены, если методы вычислительной гидродинамики (ВГ) должным образом используются для исследования потока жидкости и теплообмена в хранилищах с СНУ.

В исследованиях 2D ВГ лучше разрабатывать числовую область с бокового вида хранилища, чтобы улавливать процесс потока жидкости через твердые сферы. В противном случае числовая область, основанная на виде сверху, не может захватить процесс потока. На самом деле, в исследованиях 2D ВГ необходимо применить несколько допущений, чтобы достаточно приблизить физику в хранилище с СНУ:

- Частицы расположены таким образом, чтобы обеспечить прохождение потока теплоносителя через слой.
- Из-за межчастичного расстояния отсутствует проводящий теплообмен между твердыми частицами.
- Частицы не находятся в тепловом контакте со стенкой резервуара
- Теплопередача между частицами и стенкой хранилища является конвективной из-за потока жидкости

Принимая во внимание вышеупомянутые допущения, а также допуская, что жидкий теплоноситель является несжимаемым или сжимаемым еженедельно и не оказывает никакого влияния вязкого рассеяния на температурное поле, 2D-модель ВГ для моделирования потока жидкости и теплопередачи в СНУ представлен в следующем виде:

Уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial(u_f)}{\partial x} + \frac{\partial(v_f)}{\partial y} = 0 \tag{7}$$

Уравнения импульса:

Направление X

$$\rho_f \left(\frac{\partial(u_f)}{\partial t} + u_f \frac{\partial u_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial u_f}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_f \frac{\partial u_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_f \frac{\partial u_f}{\partial y} \right) \tag{8}$$

Направление Y

$$\rho_f \left(\frac{\partial(v_f)}{\partial t} + u_f \frac{\partial v_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial v_f}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_f \frac{\partial v_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_f \frac{\partial v_f}{\partial y} \right) \tag{9}$$

Уравнение энергии

$$\rho_f c_f \left(\frac{\partial(T_f)}{\partial t} + u_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) \tag{10}$$

Твердые частицы:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) \tag{11}$$

Граничные условия для 2D модели показано на рисунке 4.

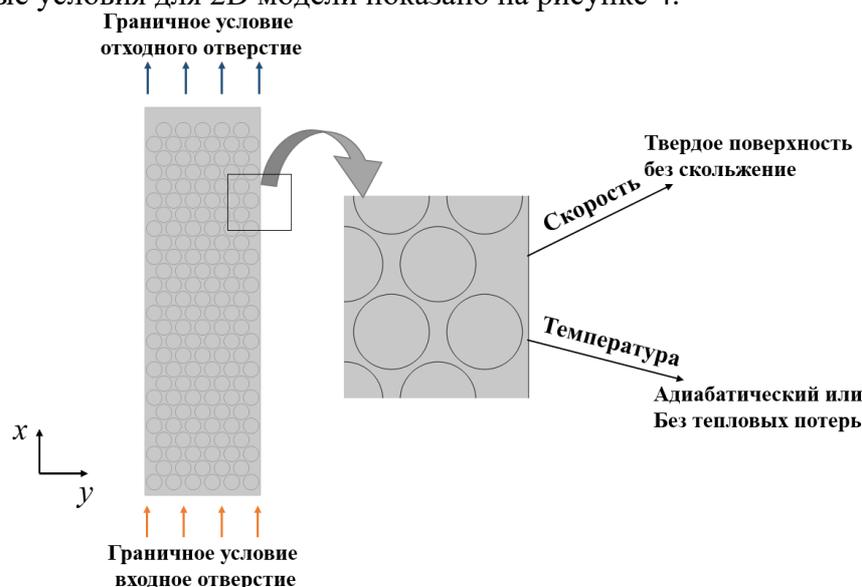


Рис. 4. Иллюстрация граничных условий для численного исследований

3. Численное моделирование и экспериментальная проверка

Физические модели проверены с использованием экспериментальных данных, предоставленных [7]. Эксперимент включает 3-часовой процесс зарядки, выполняемый в лабораторном хранилище. Размеры этого экспериментального устройства и его функциональные характеристики описаны в таблице 1. Из-за небольшого отношения отношения диаметра резервуара к диаметру твердых частиц ($D/d = 7,4$) влияние пристенной стенки на измеренные данные важный.

Интересно отметить, что модели с незначительным тепловым градиентом внутри твердых частиц могут быть приняты, когда сопротивление теплопроводности в твердом теле СНУ незначительно по сравнению с сопротивлением теплопроводности. Это условие оценивается благодаря размерному числу Биот [8]:

$$Bi = \frac{Ud}{k_s} \leq 0.1$$

Теплофизические свойства ТН и свойства твердых частиц поддерживаются постоянными (см. Таблицу 1). Отметим, что тепловой диффузией в твердой частице нельзя пренебрегать, если теплопроводность составляет 0,2 Вт/мК. Следовательно, модели, в которых тепловой диффузией внутри твердых частиц пренебрегают (т.е. $Bi \leq 0,1$), могут быть приняты для описания теплового поведения СНУ.

4. Результаты и обсуждение

Наиболее важными факторами, которые влияют на тепловое поведение СНУ для разумного накопления тепла, являются теплофизические свойства твердого накопительного материала, размер твердого материала, массовая скорость ТН и пористость слоя.

Фактически, часть воздушного потока направляется через эту слегка непористую область и поэтому не участвует в теплообмене за счет конвекции внутри СНУ. Чтобы рассмотреть эти эффекты предложено скорректировать массовую скорость G , использованную в расчетах (см. Таблицу 1). Как показано на рисунках 5) и 6) расчетные профили температуры внутри СНУ приблизительно соответствуют экспериментальным профилям, зарегистрированным, когда эффективный поток массы уменьшился на 10%. Можно также отметить, что две модели (Модель 1 и Модель 2), которые учитывают теплопроводность внутри твердых частиц, находятся в хорошем согласии с экспериментом. На рисунках 5) и 6) мы сообщили об изменении температуры ТН на выходе из резервуара для моделей. Можно наблюдать, что температура ТН на выходе из резервуара, представленная моделями 2 ниже, чем рассчитанная для модели 1. Эти результаты могут быть объяснены влиянием теплопроводности твердых частиц на тепловое поведение СНУ. Отметим, что для всех моделей профили температуры постепенно увеличиваются по высоте насадочного слоя. Такое поведение типично для системы плунжера, где фронт движется в осевом направлении. Разница между профилями ТН и температуры твердого тела может считаться незначительной.

Таблица 1. Размеры и параметры экспериментальной установки

Параметры	Величина
T_{inlet}	550 °C
T_{ini}	20 °C
H	1.2 м
D	0.148 м

E	0.4
d	0.02 м
U	0.687 Вт/(м ² К)
r^s	2680 кг/м ³
c^s	1068 Дж/(кг К)
k^s	2.5 Вт/(мК)

Во-первых, был проведен численный анализ для расчета теплового отклика системы ХТЭ во время накопления тепла. Начальная температура уплотненного слоя составляла 20 °С, а температура на входе горячей воды была постоянной и составляла 150 °С, а скорость потока массы составляла 0,004 кг/сек. Из-за малой скорости потока массы и умеренной плотности упакованных сфер поток воды рассматривался как ламинарный поток с низким числом Рейнольдса. Сравнение расчетной температуры СНУ во время зарядки показано на рис. 7. Видно, что температура СНУ постепенно увеличивается в начале периода разумного накопления тепла. Эффективная модель с СНУ учитывает температурные градиенты внутри сфер, как показано на рис. 7б, что не может быть показано с помощью модели непрерывной твердой фазы и однофазной модели. Более того, он может описывать поток воды через пустоты среди сфер, как показано на рис. 7б, который не мог быть проведен никакими предыдущими моделями. Кроме того, отвод тепла системы ХТЭ был также проанализированы.

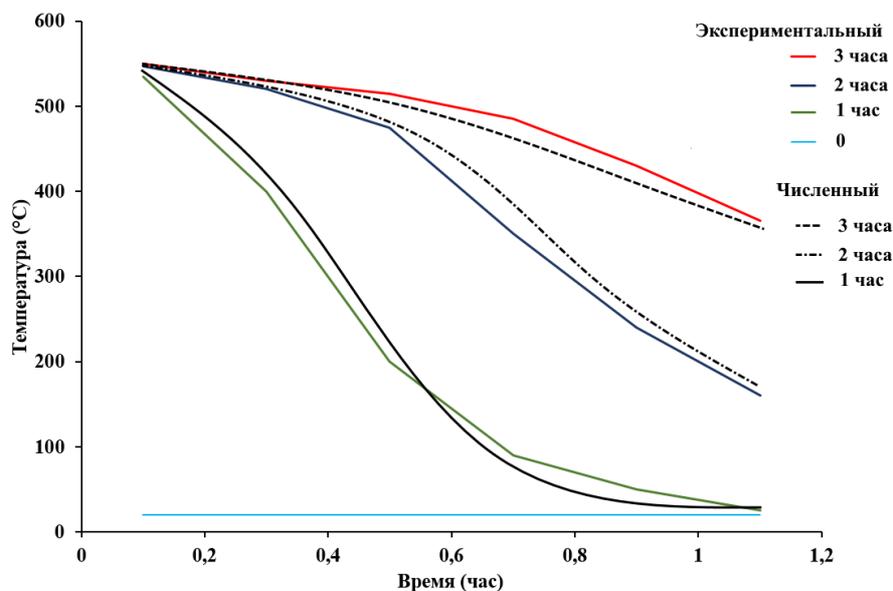


Рис. 5. Температурный профиль ТН во время зарядки (однофазный модель)

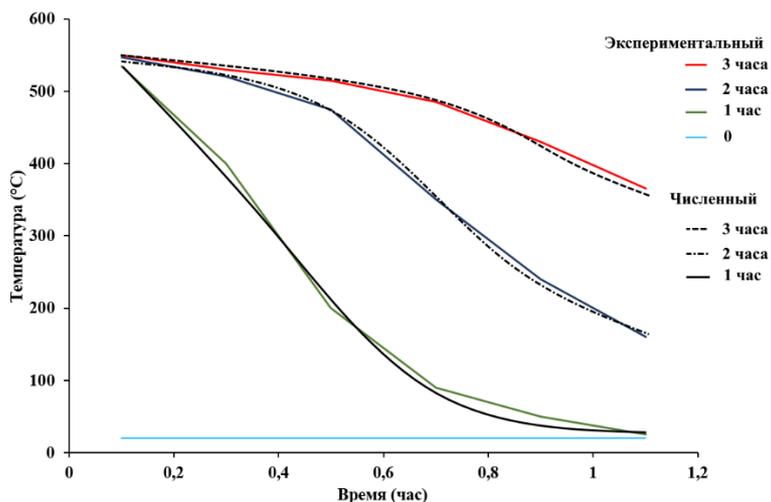


Рис. 6. Температурный профиль ТН во время зарядки (двухфазная модель)

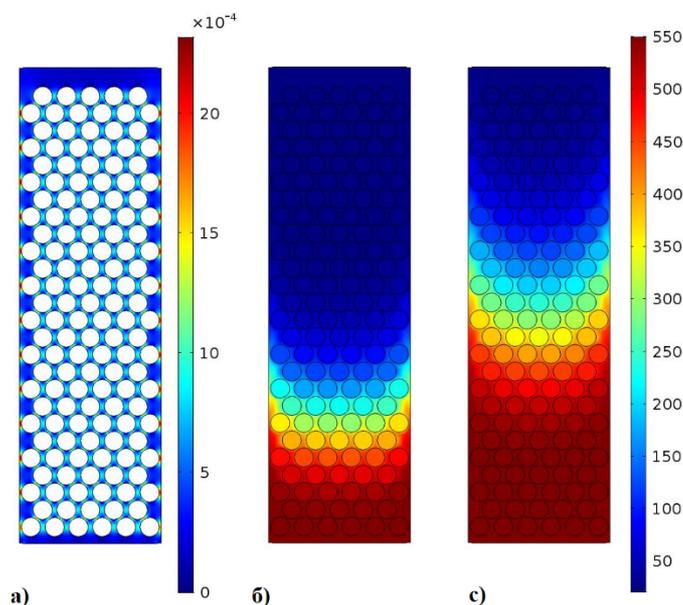


Рис. 7. Температурный профиль ТН и СНУ во время зарядки, а) профиль скорости б) с) профиль температуры

Когда течение ТН было ламинарным, существует хорошее согласие между приведенными численными результатами и экспериментальными данными, и отклонение от них находится в пределах 3 с. Кроме того, стоит упомянуть, что во время накопления тепла только анализ с использованием механизма теплопередачи с естественной конвекцией может показать лучшее согласие с экспериментальными измерениями, тогда как естественная конвекция внутри СНУ всегда игнорировалась в большей части предыдущей литературы.

5. Заключение

Численное моделирование было выполнено с двумя физическими моделями, чтобы описать тепловое поведение СНУ для разумного накопления тепла. Обнаружено, что физическое с тепловым градиентом внутри твердых частиц должно рассматриваться и приниматься только тогда, когда существует потребность в подробной информации внутри твердых частиц (например, о тепловом диффузии). Сообщается и обсуждается

влияние различных параметров на тепловое поведение и падение давления в СНУ в процессе зарядки. Установлено, что:

- на термическое поведение насадки сильно влияют массовая скорость ТН, диаметр твердых частиц и пористость слоя;
- при относительно небольших значениях массовой скорости ТН выбор твердых частиц с небольшим диаметром выгоден с точки зрения эффективности термического СНУ и требований к перекачке.

Эффективная модель для исследования потока жидкости и теплопередачи в уплотненном слое была разработана и подтверждена экспериментальными данными, имеющимися в литературе. Результаты показали, что эффективная модель с насадкой всегда может дать точные аналитические результаты. Кроме того, эффективная модель с уплотненным слоем превосходит другие модели в том, что она универсальна для различных систем СНУ; он способен детально показать поле потока в уплотненном слое и температурные градиенты внутри сфер.

Кроме того, эффективная модель с уплотненным слоем может быть использована для исследования влияния некоторых факторов на характеристики теплопередачи слоя ХТЭ, которые трудно осуществить в предыдущих моделях с уплотненным слоем, таких как расположение сфер и инкапсуляция сфер. Численные результаты, полученные с использованием модели эффективного упакованного слоя, показали следующее: 1. Скорость извлечения тепла в системе ХТЭ со случайно упакованным слоем равна выше, чем со специально упакованной кроватью. 2. Инкапсуляция СНУ оказывает существенное влияние на теплопередачу системы ХТЭ. Эффективная модель с уплотненным слоем будет одним из наиболее предпочтительных инструментов для оптимизации конструкции и работы систем ХТЭ с СНУ.

Список литературы

1. Hohmeyer, O., Bohm, S. Trends toward 100% renewable electricity supply in Germany and Europe: A paradigm shift in energy policies / O. Hohmeyer // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* / 2015. – Вып. 4(1). – С. 74-97.
2. Xu, Z., Hao, H., Li, H. Experimental study of dynamic compressive properties of fibre reinforced concrete material with different fibres / Z. Xu // *Materials & Design* / 2012. – Вып. 33. – С. 42-55.
3. Sabihuddin, S., Kirakis, A., Mueller, M. A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies / S. Sabihuddin // *Energies* / 2015. – Вып. 8(1). – С. 172-216.
4. Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., Rhafiki, T., Zeraouli, Y. Energy storage: applications and challenges / T. Kousksou // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* / 2014. – Вып. 120. – С. 59–80.
5. Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, D.Y., Rahman, M.M., Stefanakos, E.K. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants / S. Kuravi // *Prog. Energy Combust. Sci.* / 2013. – Вып. 39. – С. 285–319.
6. Ismail, KAR., Stuginsky, R. A parametric study on possible fixed bed models for PCM and sensible heat storage / KAR. Ismail // *Applied Thermal Engineering* / 1999. – Вып. 19. – С. 757–88.
7. Meier, A., Winkler, C., Wuillemin, D. Experiment for modeling high temperature rock bed storage / A. Meier // *Sol. Energy Mater.* / 1991. – Вып. 24. – С. 255–264.
8. Amin, N.A.M., Belusko, M., Bruno, F. An effectiveness-NTU model of a packed bed PCM thermal storage system / N.A.M. Amin. // *Appl. Energy* / 2014. – Вып. 134. – С. 356–362.