

УДК 620.9

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕЗЕРВУАРАХ ХРАНЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАСХОДАХ КОМПОЗИЦИОННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА**

**Гильманов Р.М., Шамсутдинов Э.В.**

*Исследовательский центр проблем энергетики Учреждения Российской академии наук Казанского научного центра РАН, Казань, Россия, e-mail: [eshamsutd.kazan@mail.ru](mailto:eshamsutd.kazan@mail.ru)*

**Представлены результаты моделирования теплообмена при ламинарном течении осесимметричной затопленной струи композиционного суспензионного топлива – водоугольной суспензии при различных расходах. В качестве программного комплекса для численных исследований использовался лицензионный пакет COMSOL Multiphysics.**

Ключевые слова: водоугольная суспензия, хранение, теплообмен.

Шифр основной специальности: 01.04.14 (технические науки)

## **MODELING OF THERMAL PROCESSES IN STORAGE TANKS AT VARIOUS EXPENSES OF COMPOSITE ORGANIC FUEL**

**Gilmanov R. M., Shamsutdinov E. V.**

*The research center of power engineering problems of institution the Russian academy of sciences the Kazan scientific centre RAS, Kazan, Russia, e-mail: [eshamsutd.kazan@mail.ru](mailto:eshamsutd.kazan@mail.ru)*

**Results of modelling of heat exchange are presented at a laminar current of the axisymmetric flooded stream composite suspension fuel – water coal suspension at various expenses. As a program complex for numerical researches the license package COMSOL Multiphysics was used.**

Key words: water coal suspension, storage, heat exchange.

### **Введение**

Развитие энергетики, металлургии, химической промышленности в значительной степени зависит от широкого и эффективного использования угля в качестве энергетического топлива. Исходя из базовых требований повышения энергоэффективности промышленного производства и экологических ограничений, промышленность испытывает потребность в экологически чистых угольных технологиях, обеспечивающих высокую полноту использования топлива при минимальной нагрузке на окружающую среду [1,2]. Замена «грязного» угля и малоэффективных методов его сжигания, а также дефицитных и дорогостоящих природного газа и мазута может быть осуществлена посредством использования композиционного (водоугольного) топлива [3]. В современных условиях в мировой практике вопросу использования водоугольного топлива придается особое значение. Работы по освоению и широкому внедрению технологии приготовления ВУС ведутся в Японии, Италии, США, Канаде и других странах. Так, например, в США с начала 90-х годов реализуется программа использования угля в энергетике с общим объемом финансирования в 100–150 млрд. долл. США, согласно которой около 20 % объема финансирования выделено на создание, транспортирование и использование водоугольного топлива. Возможности рынка для такого топлива только для Восточного побережья США оцениваются в 150 млн. т в год. Для решения проблемы внедрения водоугольного топлива в Китае создан Государственный центр водоугольных суспензий (ВУС) угольной промышленности. В 2001 г. на 8 заводах (производительностью до 600 тыс. т в год каждый) таких суспензий произведено более 2,0 млн. т; в ближайшие 20 лет планируется довести мощности по их производству до 100 млн. т в год. В России также выполняются работы по исследованию и внедрению водоугольных суспензий (ВУС), преимущественно на энергетических объектах небольшой мощности [4-7]. С начала 90-х годов такие работы проводились в рамках ФНТП «Топливо и энергия» (подпрограмма «Экологически чистая

энергетика», направление «Энергетика и технология угольных суспензий»), а также по программам «Недра России» и «Трубопроводный транспорт угольной суспензии», межотраслевой программе «Альтернативные топлива» [8].

Основными проблемами на пути к расширенному применению ВУС являются: низкие показатели стабильности основных технологических характеристик, а также отсутствие научно обоснованных методических рекомендаций по созданию систем приготовления и хранения ВУС. В связи с этим, целью работы является моделирование и исследование теплообмена в резервуарах хранения при различных расходах композиционного органического топлива – ВУС.

### Постановка задачи

Приняты следующие допущения [9,10]:

- 1) теплофизические свойства ВУС, такие как плотность  $\rho$ , теплоемкость  $c_p$  и теплопроводность  $\lambda$  меняются в ходе процесса незначительно;
- 2) кинематическая вязкость ВУС  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с, зависит от ее температуры  $T$ ;
- 3) объемной силой, влияющей на процесс теплопереноса при струйном течении ВУС, является сила тяжести.

В качестве модельного резервуара рассмотрена емкость объемом 0.2 м<sup>3</sup> со следующими характеристиками: внутренний диаметр – 0.594 м, высота – 0.845 м. Диаметр форсунки – 0.012 м, диаметр выходного патрубка – 0.012 м.

Начальная температура ВУС в резервуаре – 293 К, температура греющей струи – 343 К. Расходы ВУС через подающие сопла с соответствующими значениями скорости и числа Рейнольдса представлены в таблице 1.

Таблица 1. Объемные расходы ВУС

№ п/п	Расход ВУС, м <sup>3</sup> /с	Скорость, м/с	Число Re
1	$2.778 \cdot 10^{-4}$	0.037	11.14
2	$6.944 \cdot 10^{-4}$	0.092	27.85
3	0.0014	0.184	55.71

При моделировании теплообмена и гидродинамики в резервуаре хранения ВУС использована система уравнений движения, неразрывности и сохранения энергии. Исходная система уравнений с учетом допущений в цилиндрической системе координат  $(r, z, \varphi)$  имеет следующий вид:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) - \frac{2\mu}{r^2} v_r,$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial v_r}{\partial z} \right),$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0.$$

Для замыкания данной системы уравнений использованы следующие начальные гидродинамические и температурные условия.

1. Гидродинамические граничные условия.

1.1. На входе в резервуар считается заданным профиль вектора скорости:

$$\vec{v} = f(r, z, t).$$

1.2. На стенках резервуара граничное условие прилипания:

$$\vec{V}|_{\Gamma} = 0.$$

3. На оси резервуара выполняется условие симметрии течения:

$$(\vec{v} \cdot \vec{n}) = 0.$$

2. Температурные условия.

2.1. Температурное начальное условие:

$$T(r, z, t = 0) = T_0(r, z).$$

2.2. Тепловые граничные условия на входе в резервуар:

$$T = T_{\text{вх}}(r, z, t).$$

2.3. На стенках резервуара принимается условие полной теплоизоляции:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0.$$

2.4. Тепловые граничные условия на выходе:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0.$$

2.5. На оси резервуара выполняется условие симметрии:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

Конечным результатом численного исследования теплообмена при ламинарном течении осесимметричной затопленной свободной струи ВУС является получение распределений полей температуры, линий тока, векторного поля скорости.

### Результаты численных исследований

Численные исследования проведены для расходов ВУС  $Q = 2.778 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $6.944 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Из рисунка 1 (расход  $Q = 2.778 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ) видно, что с течением времени происходит постепенный прогрев всего объема ВУС, находящегося в резервуаре. При времени равном 1000 с струя горячей ВУС прогревает холодную суспензию до верхнего уровня, а резервуар оказывается прогретым примерно до 65 % своего объема. При времени равном 50000 с прогрето до 99% объема резервуара, а в выходном сечении ВУС имеет температуру 69,9 °С.

С самого начала процесса прогрева образуются две рециркуляционные зоны. С течением времени происходит «торможение» боковых слоев нагретой струи из-за того, что вязкость прилегающих холодных слоев ВУС намного больше. Образование зон возвратных течений начинается вблизи сопла насадки, где кинетическая энергия струи наиболее высока.

С увеличением расхода греющей струи (расход  $Q = 6.944 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ) происходит более интенсивный нагрев суспензии в объеме резервуара. При времени равном 1000 с прогревается практически до 70 % объема резервуара. С увеличением времени нагрева температура в объеме резервуара только повышается, а в выходном сечении ВУС имеет температуру 69 °С. При времени равном 50000 с. ВУС в резервуаре полностью прогревается. Как и в первом случае образуются две рециркуляционные зоны. Линии тока имеют плавный характер и со временем не меняются, что позволяет говорить об установившемся режиме течения ВУС. Рециркуляционная зона в верхней части резервуара занимает большую часть емкости в отличие от предыдущего случая.

На рисунке 2 приведены изотермы при расходе  $Q = 14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ , из которых видно, что при данном расходе для начального момента времени в середине исследуемой области практически исчезает зона с низкими значениями температуры. Эта зона смещается к стенке резервуара и по мере прогрева достаточно быстро исчезает. Это подтверждается распределением линий тока (рисунок 3), из которого видно, что в начальный момент времени для данного расхода характерно наличие трех рециркуляционных зон.

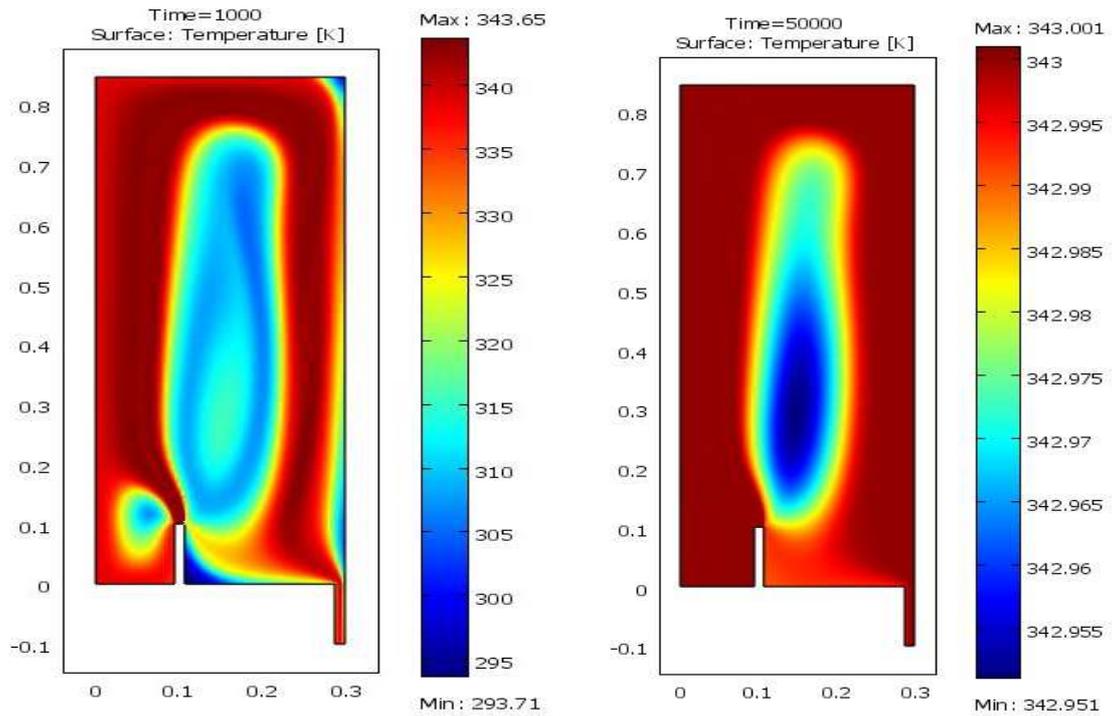


Рисунок 1. Поле температуры при  $Q = 2.778 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

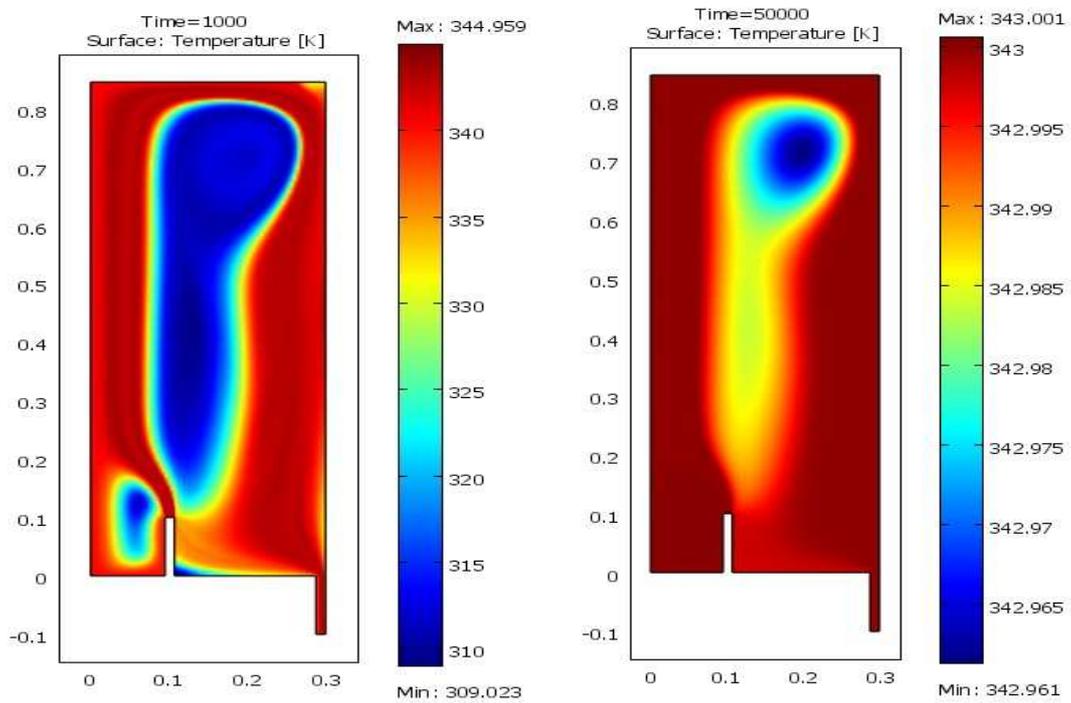


Рисунок 2. Поле температуры при  $Q = 14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

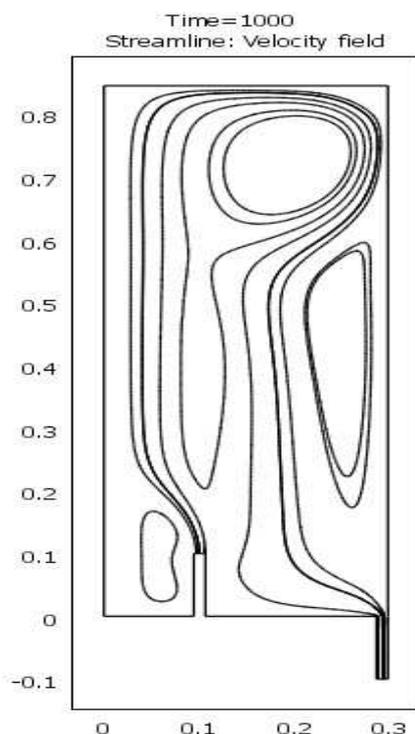


Рисунок 3. Линии тока при  $Q = 14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

Объяснение данному факту дает распределение векторного поля скорости, которое практически направлено к середине резервуара. Происходит это из-за того, что вследствие высокой кинетической энергии струя разогретой ВУС «пролетает» расстояние до крышки резервуара за короткий интервал времени и, не успев затормозиться, ударяется в стенку.

### Заключение

Сопоставление полей температур для трех рассмотренных расходов жидкости позволяет сделать вывод, что если в силу производственной необходимости требуется быстро нагреть определенное количество ВУС, то лучше использовать повышенные ее расходы. Если же требуется лишь поддерживать температуру в резервуаре до определенного значения, то эффективнее использовать более низкие расходы жидкости, так как в этом случае происходит более равномерный прогрев всего объема резервуара.

### Список литературы

1. Крапчин, И.П. Экономическая эффективность приготовления и использования водоугольных суспензий – экологически чистого топлива для электростанций / И.П. Крапчин, И.О. Потапенко // Уголь. – 2003. – № 11. – С. 50-52.
2. Измалков, А.В. Экологически чистые технологии использования угля / А.В. Измалков // Уголь. – 2004. – № 9. – С.46-53.
3. Делягин Г.Н. Экологически чистое топливо из угля / Г.Н. Делягин, В.В. Корнилов, Ю.А. Чернегов // Экологическое развитие: сб. – М.: Международный центр научной и технической информации, Комиссия по изучению производительных сил и природных ресурсов при Президиуме РАН, 1992. – Вып. 2. – С. 49-52.
4. Хидиятов, А.М. Основные результаты исследований водоугольного топлива и перспективы его использования / А.М. Хидиятов, В.И. Бабий, В.В. Осинцев и др. // Сборник научных статей. Развитие технологий подготовки и сжигания топлива на электростанциях. Под ред. Тумановского А.Г., Котлера В.Р. – М.: ВТИ, 1996. – С. 123-141.

5. Белоусов Е.В. Перспективы замены нефтяных топлив на угольные в поршневых двигателях внутреннего сгорания / Е.В. Белоусов // Уголь. – 2005. – №12. – С.44-47.

6. Трубецкой, К.Н. Водугольное топливо – результат разработки и перспективы применения в России / К.Н. Трубецкой, В.Е. Зайденваг, А.С. Кондратьев и др.// Теплоэнергетика. – 2008. – №5. – С. 49-52.

7. Шумейко М.В. Использование водо-угольных, угольно-мазутных суспензий и сверхчистых угольно-водородных технологий / М.В. Шумейко // Уголь. – 2007. – № 7. – С. 28-31.

8. Делягин Г.Н. «Эковут» – новое экологически чистое топливо XXI века / Г.Н. Делягин, С.В. Ерохин, А.П. Петраков // Химия на рубеже тысячелетий: сб. тр. Межд. научн. конф. и школы семинара ЮНЕСКО (Клязьма, 2000г.). – М.: Изд-во МГУ, 2000. – Ч. 1. – С. 101-105.

9. Гильманов Р.М. Моделирование теплообмена и гидродинамики в резервуарах хранения водугольных суспензий // Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения»: сб. тр. / Уфа: УГАТУ, 2010. – С.199-201.

10. Гильманов Р.М., Шамсутдинов Э.В. Численное исследование нестационарного теплообмена при ламинарном течении осесимметричной затопленной струи водугольной суспензии // XVII Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2011 : сб. тр. / Алушта, Крым, 2011.– С. 515-517.

Работа выполнена в ходе реализации ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009-2013 годы (госконтракты №02.740.11.0062, 02.740.11.0753 №П557, №П1014).

**Рецензенты:**

Конахина И.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Промышленная теплоэнергетика ГОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань.

Николаев А.Н., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ОПТ ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань.

**Работа получена 08.09.2011.**