

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Р.М. ГИЛЬМАНОВ*, А.И. ФЕДОТОВ*, Э.В. ШАМСУТДИНОВ**

*Казанский научный центр Российской академии наук

**Казанский государственный энергетический университет

Прогнозируемое в первой половине XXI века повышение доли твердого топлива в структуре топливно-энергетического баланса страны обусловлено его крупными запасами и достаточно высокими ценами нефти и газа. В тоже время экологические проблемы, возникающие при использовании угольного топлива, требуют разработки и внедрения новых экономически выгодных и экологически «чистых» угольных технологий, которые обеспечивают максимально высокую полноту использования добытого топлива. Особенно остры эти проблемы для угольных регионов России, испытывающих недостаток в экологически чистых природных энергоносителях. Поэтому использование угля для создания водоугольных топлив (ВУТ) является актуальным.

Несмотря на актуальность проблем исследования систем подготовки, транспортировки и хранения ВУТ для промышленной теплоэнергетики, исследований в этой области явно недостаточно. Не хватает данных и их обобщения с последующей рекомендацией к практическому использованию. Такая ситуация затрудняет определение наилучшего метода транспортировки и хранения ВУТ и проведение последующего расчета оборудования систем подготовки к сжиганию, транспортировки при ламинарном режиме течения композиционного органического топлива на основе водоугольных топлив. Это требует, в свою очередь, осуществить моделирование и исследование процессов теплообмена подготовки, гидротранспорта и хранения водоугольного топлива, свойства которого существенно отличаются от свойств мазута.

Для исследования процессов хранения и разогрева водоугольного топлива разработан экспериментальный стенд, позволяющий моделировать рассматриваемые процессы при различных режимах работы оборудования (рис. 1).

Принцип работы экспериментального стенда включает в себя «холодный» контур (контур циркуляции ВУТ) и «горячий» контур (контур циркуляции воды). Водоугольное топливо из емкости 1 перистальтическим насосом 2 подается в буферную емкость 3, которая позволяет погасить пульсации потока, создаваемые насосом. Далее ВУТ поступает в рабочий участок 7 (длина 1 м, диаметр 20 мм) с дискретной шероховатостью, на входе которого установлены датчики температуры 6 с преобразователем давления. На выходе из рабочего участка также происходит замер давления и температуры ВУТ. После этого ВУТ поступает в теплообменник 4, для последующего охлаждения, и далее – в емкость 1. «Холодный» контур обеспечивает постоянство температуры ВУТ на входе в рабочий участок 7 и позволяет охладить ВУТ после его прохождения. Регулирование расхода ВУТ производится изменением числа оборотов насоса 2 при помощи преобразователей частоты 12. Показания температуры с термопреобразователей и термопар поступают на измеритель-регулятор 13. «Горячий» контур состоит из бака 11, объемом 0,125 м³, циркуляционного насоса 9, с возможностью ступенчатой регулировки расхода, и расходомера-счетчика 8. Нагрев воды осуществляется электронагревателем 10, мощностью 30 кВт. Из теплообменника разогретое топливо подается в коллектор, установленный на днище емкости 1, откуда

через насадки поступает в модельный резервуар. Для приготовления топлива используется угольная пыль, приготовленная в вибромельнице ВМ-200. Дисперсный состав пыли контролируется при помощи ситового анализа, который осуществляется на вибростоле рассевом угольной пыли на ситах с различным диаметром.

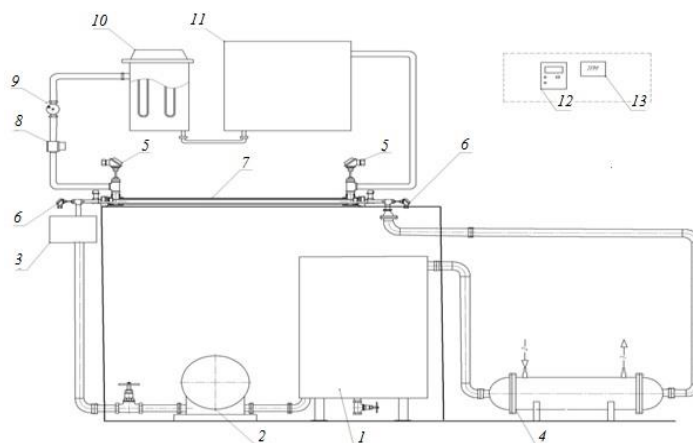


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

Для экспериментальных исследований интенсификации теплообмена выбраны следующие геометрические характеристики дискретно-шероховатого канала:

- винтовая накатка [1]: 1) как показал анализ литературы, наиболее интенсивная интенсификация достигается при следующих значениях: $S/D=0,72$ и $d/D=0,72$, где S – шаг выступов; D – диаметр трубопровода; d – диаметр трубопровода в месте сужения; 2) в некоторых случаях выгодно применять накатку с низкими выступами: $S/D=1,78$ и $d/D=0,85$;

- поперечная накатка со следующими характеристиками: 1) значения $S/D=0,66$ и $d/D=0,8$ [1]; 2) значения $S/D=0,8$ и $d/D=0,8$ [2].

Для исследования процессов теплообмена в резервуарах хранения насадки выполнены при различных углах наклона, таких как 45° , 90° , 135° и 180° (угол отсчитывается от вертикальной оси против часовой стрелки).

Результаты исследований интенсификации теплообмена

На рис. 2 показана зависимость перепада давления от числа Re для различных видов дискретной шероховатости канала. Из рисунка видно, что гидравлическое сопротивление резко увеличивается для всех предложенных интенсификаторов по сравнению с гладкой трубой.

Исследования также показали (рис. 3), что для всех исследуемых интенсификаторов график имеет неравномерный характер. Так для поперечной накатки с геометрическими характеристиками $d/D=0,8$ и $S/D=0,6$ при $Re<10$ отношение критериев Нуссельта больше 1, при этом необходимо отметить, что при малых значениях $1<Re<3$ отношение критериев Нуссельта достигает 4–5,8, что свидетельствует об эффективности применения данного вида шероховатой поверхности при данном числе Рейнольдса. В интервале значений $10<Re$ отношение критериев Нуссельта меньше 1 – это указывает на то, что применение данного вида дискретной шероховатости при таких числах Рейнольдса и расходах не эффективно. Для поперечной накатки с геометрическими характеристиками $d/D=0,8$ и $S/D=0,8$ во всем исследуемом диапазоне чисел Re отношение критериев Нуссельта больше 1, график имеет максимум в виде значений критериев Нуссельта при $Re=10$, что также

свидетельствует об эффективности применения данного вида шероховатой поверхности во всем исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса.

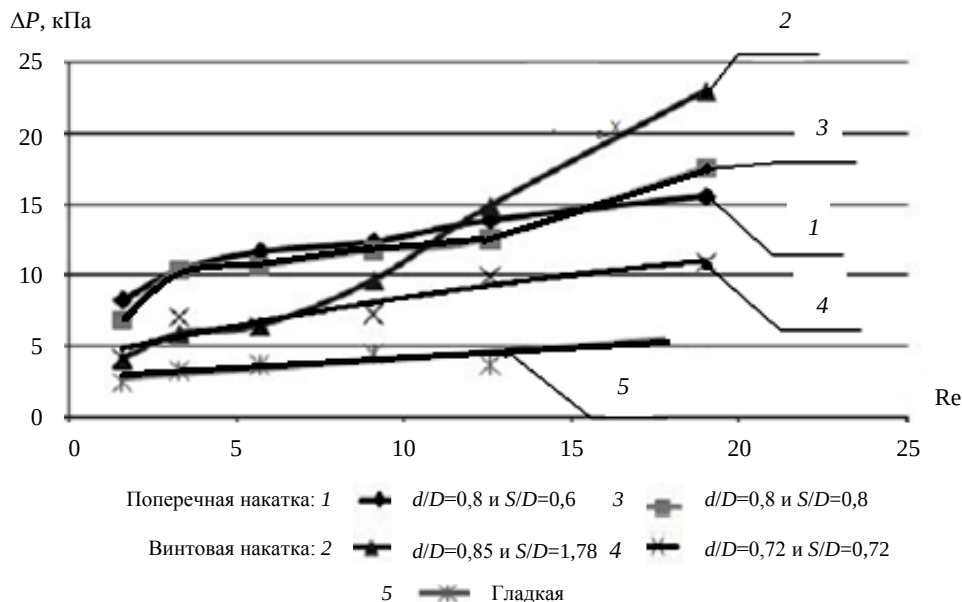


Рис. 2. Зависимость перепада давления ΔP от числа Re для различных видов дискретной шероховатости

Для винтовой накатки с геометрическими характеристиками $d/D=0,85$ и $S/D=1,78$ при $Re < 3$ отношение критериев Нуссельта больше 1. При остальных значениях Re отношение критериев Нуссельта меньше 1 – это указывает на то, что применение данного вида дискретной шероховатости эффективно только в очень узком диапазоне чисел Re . Для винтовой накатки с геометрическими характеристиками $d/D=0,72$ и $S/D=0,72$ график имеет более плавный и равномерный характер, однако отношение критериев Нуссельта в исследуемом диапазоне меньше 1, что делает применение данного вида дискретной шероховатости не эффективным.

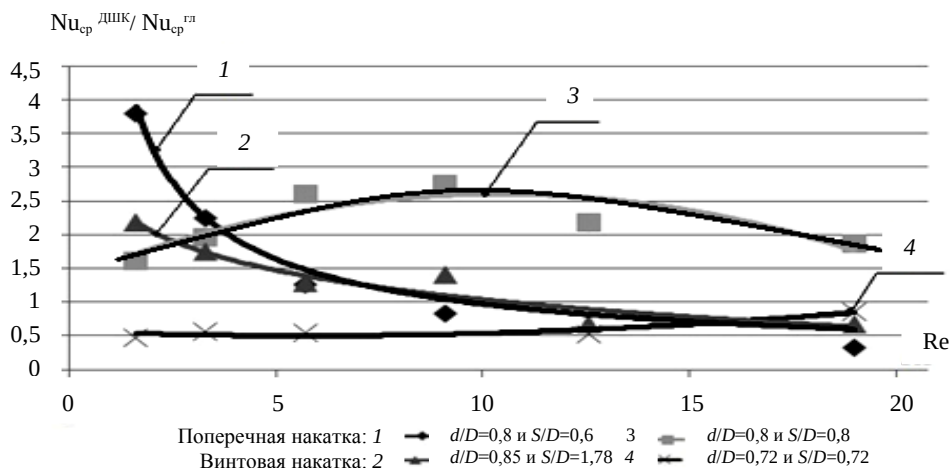


Рис. 3. Отношения критерия Нуссельта дискретно-шероховатого канала к критерию Нуссельта гладкого канала в зависимости от чисел Рейнольдса

Результаты исследований процессов теплообмена в резервуарах хранения

В результате эксперимента получены зависимости изменения температуры водоугольного топлива в резервуаре от времени разогрева и хранения при различных расходах ВУТ и углах наклона насадки. Для иллюстрации полученных данных на рис. 4 показаны результаты исследований при различных углах наклона насадки и расходе $Q=0,949 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

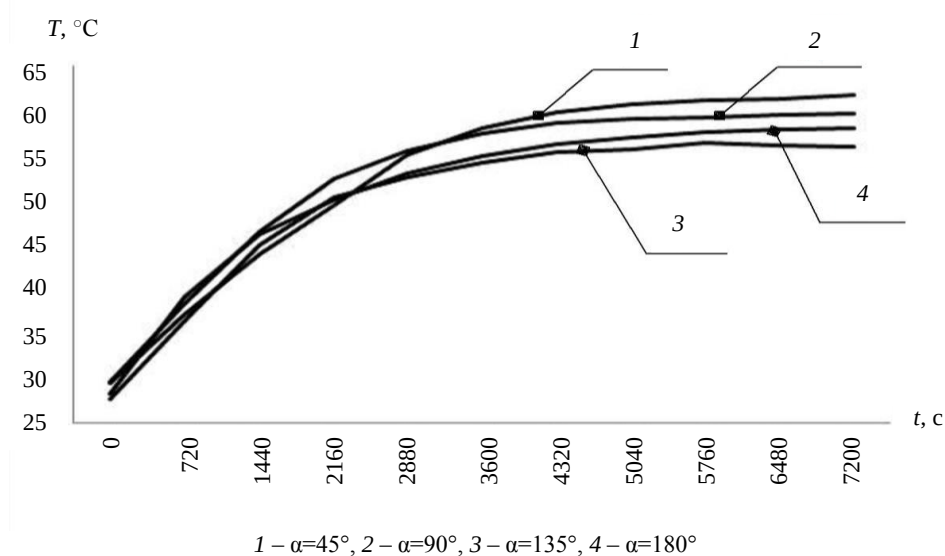


Рис. 4. Изменение средней температуры ВУТ при расходе $Q=0,949 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что при расходе $Q=0,302 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ наибольший прогрев ВУТ наблюдается при угле наклона форсунки равном 90° , при этом средняя температура топлива в резервуаре равна $56,7 ^\circ\text{C}$. Наименьший прогрев топлива в резервуаре наблюдался при угле наклона форсунки равном 180° , при этом средняя температура в резервуаре равна $51,5 ^\circ\text{C}$.

При расходе $Q=0,625 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ наибольший прогрев ВУТ происходит при угле наклона форсунки равном 45° , при этом средняя температура топлива в резервуаре равна $58,8 ^\circ\text{C}$. Наименьший прогрев топлива в резервуаре наблюдался при угле наклона форсунки равном 180° , при этом средняя температура в резервуаре равна $55,5 ^\circ\text{C}$.

При расходе $Q=0,949 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 4) наибольший прогрев ВУС происходит при угле наклона форсунки равном 45° , при этом средняя температура суспензии в резервуаре равна $61,6 ^\circ\text{C}$. Наименьший прогрев суспензии в резервуаре наблюдался при угле наклона форсунки равном 135° , при этом средняя температура в резервуаре равна $55,8 ^\circ\text{C}$ [3].

Для численного исследования процессов хранения разработана математическая модель теплообмена и гидродинамики в резервуарах хранения водоугольного топлива, позволяющая определять оптимальные конструктивные параметры подающих сопел при различных режимах работы оборудования. В ходе численного исследования предполагалось получить данные, позволяющие провести анализ процесса хранения ВУТ в динамических условиях за счет изменения режимных параметров и температурных условий хранения.

При создании математической модели приняты следующие допущения [4,5]:

- 1) теплофизические свойства ВУТ, такие как плотность ρ , теплоемкость c_p и теплопроводность λ меняются в ходе процесса незначительно;
- 2) кинематическая вязкость ВУТ ν , $\text{м}^2/\text{с}$, зависит от его температуры T ;

3) объемной силой, влияющей на процесс теплопереноса при струйном течении ВУТ, является сила тяжести.

В качестве модельного резервуара рассмотрена емкость объемом $0,2 \text{ м}^3$ со следующими характеристиками: внутренний диаметр – $0,594 \text{ м}$, высота – $0,845 \text{ м}$. Диаметр форсунки – $0,015 \text{ м}$, диаметр выходного патрубка – $0,015 \text{ м}$. Начальная температура ВУТ в резервуаре – 303 К , температура греющей струи – 333 К . В качестве рабочей среды используется водоугольное топливо с различной массовой долей (концентрацией) угля. Эксперимент проводился для трех расходов суспензии: $Q=0,302 \cdot 10^{-4}$; $0,625 \cdot 10^{-4}$; $0,949 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, при этом скорость потока на выходе из насадки была равна: $\omega=0,1703$; $0,3537$; $0,537 \text{ м/с}$.

На рис. 5 показана геометрическая область исследования. Расчетная сетка состоит из 278832 доменных элементов, 14046 граничных элементов и 912 краевых элементов.

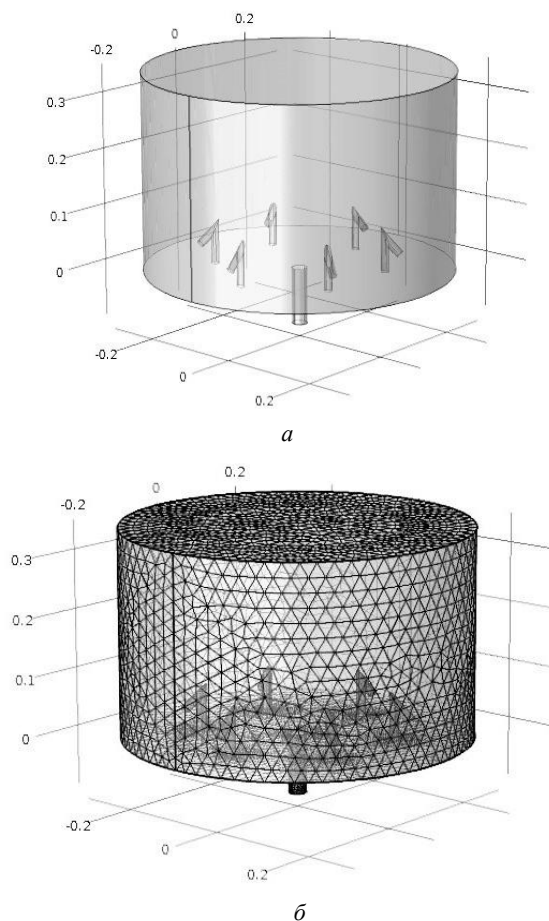


Рис. 5. Геометрическая область исследования (а), расчетная сетка (б)

При исследовании теплообмена и гидродинамики в резервуарах для хранения ВУТ использовалась основная система уравнений, которая базируется на фундаментальной системе дифференциальных уравнений сохранения энергии и механики сплошной среды – уравнения движения и неразрывности.

Исходя принятых допущений, система уравнений переноса энергии, движения и неразрывности, описывающая нестационарный теплообмен в резервуарах хранения, будет иметь следующий вид:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{vh} + W_p, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot \left[-pl + \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) I \right] + F, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0. \quad (3)$$

Для замыкания данной системы уравнений в качестве естественных гидродинамических граничных условий приняты условия, приведенные ниже.

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

$$\vec{u} = f(x, y, z, t). \quad (4)$$

2. На стенках резервуара принимается граничное условие прилипания:

$$\vec{V}|_{\Gamma} = 0. \quad (5)$$

3. На выходе из резервуара принимается

$$P = \text{const} = 0. \quad (6)$$

Температурное начальное граничное условие имеет вид:

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0(x, y, z). \quad (7)$$

1. Тепловые граничные условия на входе в резервуар принимают вид:

$$T = T_{\text{вх}}(x, y, z, t). \quad (8)$$

В частности, температура жидкости на выходе из насадки может иметь постоянное значение:

$$T_{\text{вх}}(r, z, t) = T_1 = \text{const}. \quad (9)$$

2. На стенках резервуара принимается условие полной теплоизоляции:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

3. Тепловые граничные условия на выходе принимаются:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

Высококонцентрированные водоугольные топлива с содержанием угольной пыли более 45% по массе являются неньютоновскими жидкостями, у которых динамическая вязкость уменьшается с увеличением скорости сдвига. Отечественными и зарубежными авторами предложены многочисленные модели для описания зависимости вязкости от доли твердых частиц в суспензии, обзор и подробный анализ которых проведен в монографиях [4, 5].

В данной работе использовалась полуэмпирическая зависимость, и вязкость водоугольного топлива задавалась по модели *Carreau*:

$$\mu(\gamma) = \mu_{\text{inf}} + (\mu_0 - \mu_{\text{inf}}) \left[1 + (\lambda \gamma)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}}. \quad (12)$$

Коэффициенты для уравнения (12) были получены из дополнительных экспериментальных исследований вязкости ВУТ на ротационном вискозиметре *Rheomat RM 100*. Были исследованы водоугольные топлива с содержанием угольной пыли 60% по массе. Угольная пыль имела бифракционный состав: крупная фракция представляла собой остаток на сите 125 мкм, мелкая фракция состояла из частиц со средним диаметром 10 мкм, который определялся при помощи микроскопа. Содержание мелкой фракции изменялось от 0 до 10% по массе. Были получены значения динамической вязкости топлива в диапазоне скоростей сдвига от 8,43 до 72,5 с⁻¹. После проведения статистической обработки определялись средние значения. Результаты исследований показаны на рис. 6.

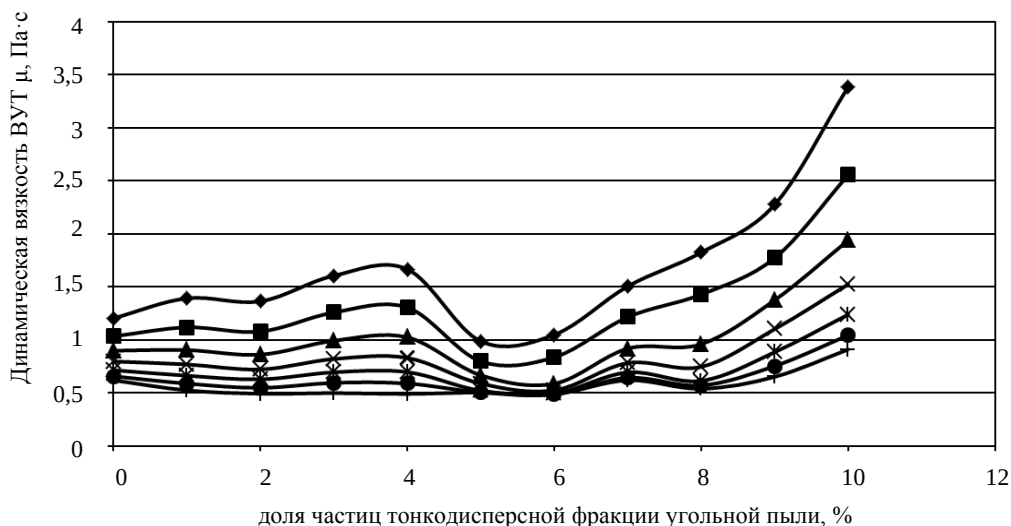


Рис. 6. Зависимости динамической вязкости водоугольного топлива бифракционного состава от доли мелкой фракции при различных скоростях сдвига γ :

—♦— 8,43 с⁻¹, —■— 12,1 с⁻¹; —▲— 17,5 с⁻¹;
 —×— 24,7 с⁻¹; —*— 35,3 с⁻¹; —●— 50,6 с⁻¹; —+— 72,5 с⁻¹.

В качестве модельного резервуара рассмотрена емкость объемом 0,2 м³ со следующими характеристиками: внутренний диаметр – 0,594 м, высота – 0,845 м. Диаметр форсунки – 0,015 м, диаметр выходного патрубка – 0,015 м. Начальная температура ВУТ в резервуаре – 303 К, температура греющей струи – 333 К. В качестве рабочей среды используется водоугольное топливо с различной массовой долей (концентрацией) угля. Эксперимент проводился для трех расходов суспензии: $Q=0,302 \cdot 10^{-4}$; $0,625 \cdot 10^{-4}$; $0,949 \cdot 10^{-4}$ м³/с, при этом скорость потока на выходе из насадки была равна: $\omega=0,1703$; $0,3537$; $0,537$ м/с.

В результате численных исследований получены зависимости изменения температуры водоугольного топлива в резервуаре от времени разогрева и хранения при различных расходах ВУТ и углах наклона насадки. Расчеты проводились на разных уровнях: на расстояниях 10, 20 и 30 см от дна резервуара. Математическая модель позволяет проанализировать изменение температуры по высоте резервуара и определить среднее значение. Для иллюстрации полученных данных на рис. 7 представлены результаты исследований при расходе $Q=0,949 \cdot 10^{-3}$ м³/с при угле наклона форсунки 45°. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что при

расходе $Q=0,302 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ наибольший прогрев ВУТ наблюдается при угле наклона форсунки равном 45° , при этом средняя температура топлива в резервуаре равна $57,7^\circ \text{C}$. Наименьший прогрев топлива в резервуаре наблюдался при угле наклона форсунки равном 180° , при этом средняя температура в резервуаре равна $54,8^\circ \text{C}$.

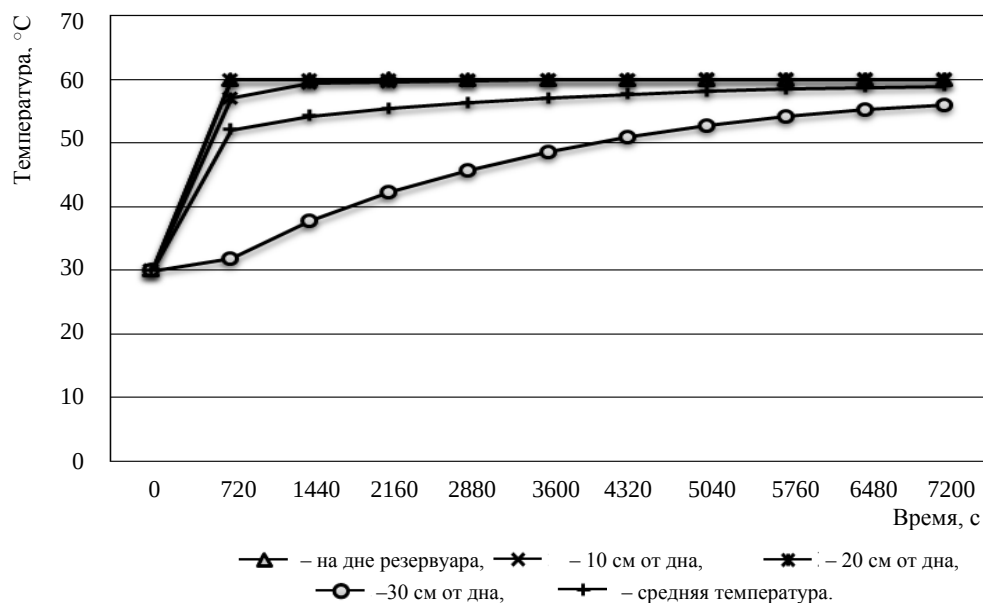


Рис. 7. Изменение температуры ВУТ (60%) в резервуаре при расходе $Q=0,949 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ при $\alpha=45^\circ$

При расходе $Q=0,625 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ наибольший прогрев ВУТ происходит при угле наклона форсунки равном 45° , при этом средняя температура топлива в резервуаре равна $58,7^\circ \text{C}$. Наименьший прогрев топлива в резервуаре наблюдался при угле наклона форсунки равном 180° , при этом средняя температура в резервуаре равна $55,5^\circ \text{C}$.

При расходе $Q=0,949 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ наибольший прогрев ВУТ происходит при угле наклона форсунки равном 45° , при этом средняя температура суспензии в резервуаре равна $59,0^\circ \text{C}$. Наименьший прогрев топлива в резервуаре наблюдался при угле наклона форсунки равном 135° , при этом средняя температура в резервуаре равна $55,8^\circ \text{C}$.

Таким образом, как показали экспериментальные данные, при скорости течения топлива из подающей насадки равной $0,144 \text{ м/с}$ целесообразно использовать угол наклона сопла насадки равным 90° . При этом, за счет малых скоростей и эффекта возникновения обратных течений после удара о стенку резервуара струи нагретого топлива, наблюдается наилучший прогрев по объему резервуара. При скорости течения топлива более $0,144 \text{ м/с}$ целесообразно использовать угол наклона насадки равным 45° . При этом угле наклона, несмотря на увеличение скорости практически в три раза по сравнению с предыдущим случаем, наблюдается эффективный прогрев топлива практически по всему резервуару. Объясняется это тем, что в этом случае струя топлива частично направлена на дно резервуара, в результате удара о которое струя разворачивается вверх. За счет этого увеличивается время пребывания нагретой струи в объеме резервуара. Использование насадки с углом наклона равным 135° или 180° нецелесообразно для всех рассмотренных скоростей вследствие низкой эффективности прогрева резервуара.

Анализ полученных результатов показывает, что при определенном времени прогрева разброс температуры по высоте резервуара становится незначительным и дальнейшее перемешивание нецелесообразно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №14-08-31405-мол_а, №14-08-00333_а), а также в рамках гос. задания ФАНО №0217-2014-0004 «Разработка физико-химических основ и технологического оформления процессов функционирования энерготехнологических комплексов по производству энергии и химических продуктов, интегрированных в региональные системы электро- и теплоснабжения»

Литература

1. Назмеев Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах. М.: Энергоатомиздат, 1998. 376 с.
2. Кадыйров А.И., Вачагина Е.К. Интенсификация подогрева водоугольных суспензий в проточных каналах с помощью периодически расположенных кольцевых вставок // Материалы X Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». Казань, 1-3 декабря 2009г. С. 282-289.
3. Гильманов Р.М., Шамсутдинов Э.В. Исследование процессов теплообмена в модельном резервуаре хранения при различных расходах композиционного органического топлива // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №3-4. С.131-134.
4. Гильманов Р.М. Моделирование теплообмена и гидродинамики в резервуарах хранения водоугольных 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.
5. Гильманов Р.М., Шамсутдинов Э.В. Численное исследование нестационарного теплообмена при ламинарном течении осесимметричной затопленной струи водоугольной суспензии // XVII Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСПИС'2011: сб. тр. / Алушта, Крым, 2011. С. 515-517.

Поступила в редакцию

30 декабря 2015 г.

Гильманов Руслан Марселевич – Казанский научный центр Российской академии наук (КазНЦ РАН). Тел: 8(843)231-90-05, 8(927)4257746. E-mail: russel777@yandex.ru.

Федотов Алексей Игоревич – Казанский научный центр Российской академии наук (КазНЦ РАН). Тел: 8(927)6751333. E-mail: fedotovran@mail.ru.

Шамсутдинов Эмиль Васильевич – канд. техн. наук, проректор по НР Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(843)519-43-43; 8(919)6943650. E-mail: EShamsutd.kazan@mail.ru.