

УДК 536.24.021

Исследование регенеративной системы охлаждения при использовании суспензии наночастиц теплопроводного металла в н-декане*

К.Ю. Арефьев^{1,2}, А.М. Савельев^{1,3}, А.В. Воронцов¹, С.В. Кручков¹

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

²*Московский физико-технический институт, Долгопрудный,
Московская обл.*

³*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

E-mail: kruchkov-93@mail.ru

Представлены результаты расчетных оценок эффективности регенеративного охлаждения модельного цилиндрического проточного тракта при использовании в качестве горючего-хладагента суспензии наночастиц теплопроводного металла в н-декане. Адаптирована стандартная математическая модель сопряженного теплообмена с учетом температурных зависимостей теплофизических свойств суспензии наночастиц металла и н-декана. Приведены данные по прогреву наносуспензии и стенок модельного проточного тракта по длине при разном содержании в суспензии металлических наночастиц. Показана область, где использование суспензии дает преимущества по теплосъему относительно н-декана.

Ключевые слова: н-декан, суспензия, наночастицы, теплообмен, цилиндрический проточный тракт.

Введение

В последнее время проявляется большой интерес к исследованиям особенностей теплофизических процессов в системах регенеративного охлаждения камер сгорания при использовании суспензий наночастиц металлов в жидких органических энергоносителях (далее — наносуспензия). Наночастицы могут состоять из алюминия, магния, железа, меди, их сплавов и соединений, а также из некоторых металлоидов. Добавление таких наночастиц рассматривается как эффективный способ повышения энергоемкости и теплопроводности органических энергоносителей [1–5]. Результаты экспериментов с горением суспензий наночастиц показали, что в отличие от частиц микронных размеров, которые подавляют горение органического энергоносителя [6], наночастицы действуют как стимулятор горения, сокращая период задержки воспламенения паров органического

* Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 20-19-00419.

энергонасосителя в несколько раз [7–9]. Помимо стимулирования горения, в экспериментах зафиксированы снижение температуры воспламенения углеводородных капель, увеличение скорости их испарения, повышение полноты сгорания и расширение концентрационных пределов воспламенения топливных паров [10–13]. Эти результаты показывают перспективность применения наносуспенсион в специализированных тепловых машинах на энергоемких энергонасосителях, когда предъявляются повышенные требования к эффективности функционирования как самой камеры сгорания, так и системы ее охлаждения.

Вместе с тем нужно отметить, что многие аспекты применения наносуспенсион в качестве энергонасосителей остаются пока недостаточно изученными. Здесь необходимо выделить прежде всего особенности работы регенеративной системы охлаждения при использовании в ней в качестве хладагента наносуспенсион. С учетом теплового состояния огневой стенки рубашки охлаждения присадки наночастиц влияют на работу регенеративной системы двояко. В частности, присадки алюминия, ввиду малого стехиометрического отношения кислород/алюминий, повышают температуру продуктов сгорания, что приводит к увеличению теплового потока в огневую стенку рубашки охлаждения. В то же время присадки наночастиц увеличивают теплопроводность энергонасосителя, что интенсифицирует теплоотдачу от стенки к охладителю и способствует понижению температуры огневой стенки. Кроме того, при повышении содержания наночастиц происходит снижение удельной теплоемкости суспензии, что влечет за собой более интенсивное повышение температуры хладагента при охлаждении и некоторое снижение хладоресурса энергонасосителя.

Вышеперечисленные факторы по-разному воздействуют на интегральную оценку эффективности применения суспензий наночастиц металла в качестве хладагента. Поэтому в настоящей работе проведено параметрическое расчетно-аналитическое исследование влияния присадок наночастиц металла на состояние модельного цилиндрического проточного тракта с регенеративной системой охлаждения. Задачами работы являлись:

— адаптация стандартной математической модели сопряженного теплообмена применительно к цилиндрическому тракту с регенеративной системой охлаждения с учетом зависимости теплофизических свойств горючего-хладагента от содержания в нем наночастиц и от его температуры;

— проведение параметрических расчетов и выявление на их основе особенностей теплового состояния модельного проточного тракта и допустимых режимов его работы.

Для решения поставленных задач в качестве горючего-хладагента рассмотрена наносуспензия на основе *n*-декана с добавками частиц металла, по теплофизическим свойствам близкого к алюминию. Проведена оценка охлаждающей способности наносуспенсион по комплексу теплофизических параметров и решена сопряженная тепловая задача для модельного цилиндрического тракта с регенеративным охлаждением диаметром $D = 0,4$ м, схема которого приведена на рис. 1. Предполагается, что горючее-хладагент 1 проходит по каналам 2 системы регенеративного охлаждения, затем через пилон 3 подается в проточный тракт 4, где смешивается с воздухом 5 и сгорает, выделяя некоторое количество теплоты Q . Материал стенок 6 каналов охлаждения — медный сплав.

Оценивалась эффективность наносуспенсион как хладагента при вариации массовой доли Z частиц металла в *n*-декане в диапазоне 0–10 % и расходонапряженности газового

потока в проточном тракте $\Omega = \frac{4(G_{\text{в}} + G_{\text{nf}})}{\pi D^2}$ в диапазоне от 10 до 1000 кг/(с·м²). Здесь

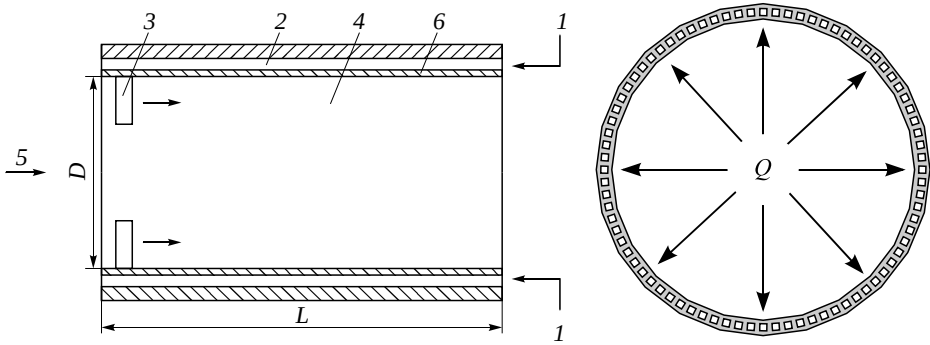


Рис. 1. Схема модельного проточного тракта с регенеративным охлаждением.

1 — хладагент, 2 — каналы системы регенеративного охлаждения, 3 — пилон, 4 — модельный проточный тракт, 5 — поток воздуха, 6 — огневая стенка проточного тракта.

G_b — массовый расход воздуха, G_{nf} — массовый расход наносuspензии, D — эквивалентный диаметр поперечного сечения проточного тракта. Коэффициент избытка воздуха принимался постоянным $\alpha = \frac{G_b}{G_{nf} \cdot K_{m0}} = 1$. Здесь $K_{m0} = f(Z)$ — стехиометрическое соотношение

компонентов топливной смеси. Исследования выполнены для проточного тракта с относительным удлинением $L/D = 4$, давление в проточном тракте $p_k = 0,3$ МПа.

В расчетах принято, что начальная температура наносuspензии составляет 300 К. Давление наносuspензии в каналах системы охлаждения превышает критическое значение для н-декана (21,17 бар) [14]. В этом случае основа наносuspензии (н-декан) при нагреве в каналах охлаждения находится в жидком состоянии (фазовый переход отсутствует) [15].

Теплофизические свойства наносuspензии

Согласно [3], для определения вязкости наносuspензии при значениях объемных концентраций частиц $\varphi \leq 1$ % может быть применена формула Эйнштейна, а для более высоких значений φ изменение вязкости может быть описано следующей зависимостью [16–20]:

$$\mu_{nf} = \mu_{liq} (1 + a\varphi + b\varphi^2), \quad (1)$$

где μ_{liq} — вязкость н-декана [19], $\varphi = f(Z)$ — объемная доля частиц металла, коэффициенты a , b являются переменными в зависимости от наносuspензии. Так, согласно [16], для наносuspензии с частицами оксида алюминия $a = 7,3$, $b = 123$. При использовании данной зависимости коэффициент динамической вязкости при массовой доле частиц 10 % увеличивается примерно на 30 % относительно чистого н-декана для температуры 300 К (рис. 2). Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными работ [3, 21, 22].

Теплопроводность наносuspензии, согласно [17, 23, 24], находится в пределах, которые ограничиваются снизу и сверху следующими соотношениями:

$$\lambda_{nf \min} = \lambda_{liq} \left(1 + \frac{3\varphi(\lambda_{Me} - \lambda_{liq})}{3\lambda_{liq} + (1 - \varphi)(\lambda_{Me} - \lambda_{liq})} \right),$$

Рис. 2. Увеличение вязкости наносuspензии на основе н-декана в зависимости от массовой доли частиц металла.

$$\lambda_{nf \max} = \lambda_{liq} \left(1 + \frac{3(1-\varphi)(\lambda_{Me} - \lambda_{liq})}{3\lambda_{Me} - \varphi(\lambda_{Me} - \lambda_{liq})} \right),$$

где λ_{liq} — теплопроводность н-декана [14], λ_{Me} — теплопроводность металла [25]. Для того чтобы определить эффективное значение коэффициента теплопроводности, был введен эмпирический коэффициент K , который для рассматриваемой наносuspензии равен 0,992, что хорошо согласуется с данными [21, 23, 26–28]. Далее при расчетах коэффициента теплопроводности использовалась зависимость вида

$$\lambda_{nf} = K\lambda_{liq} \left(1 + \frac{3\varphi(\lambda_{Me} - \lambda_{liq})}{3\lambda_{liq} + (1-\varphi)(\lambda_{Me} - \lambda_{liq})} \right) + (1-K)\lambda_{Me} \left(1 - \frac{3(1-\varphi)(\lambda_{Me} - \lambda_{liq})}{3\lambda_{Me} - \varphi(\lambda_{Me} - \lambda_{liq})} \right). \quad (2)$$

При использовании зависимости (2) для температуры 300 К и при массовой доле частиц 10 % коэффициент теплопроводности увеличивается на 35 % относительно чистого н-декана (рис. 3).

Теплоемкость и энтальпия наносuspензии рассчитываются по соотношениям:

$$c_{pnf} = c_{pli} (1-Z) + c_{pMe} Z,$$

$$i_{nf} = i_{liq} (1-Z) + i_{Me} Z,$$

где c_{pli} , i_{liq} — теплоемкость и энтальпия н-декана [14], c_{pMe} , i_{Me} — теплоемкость и энтальпия металла [25].

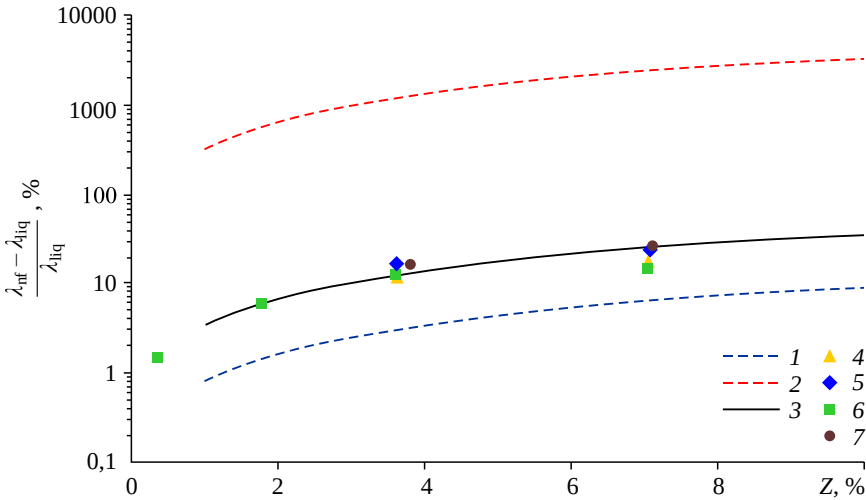


Рис. 3. Относительный коэффициент теплопроводности наносuspензии на основе н-декана в зависимости от массовой доли частиц металла.

1 — $\lambda_{nf \min}$, 2 — $\lambda_{nf \max}$, 3 — λ_{nf} ,
4 — Me + EO [26], 5 — Me + EG [26], 6 — Me + EG [27], 7 — Me + EO [22].

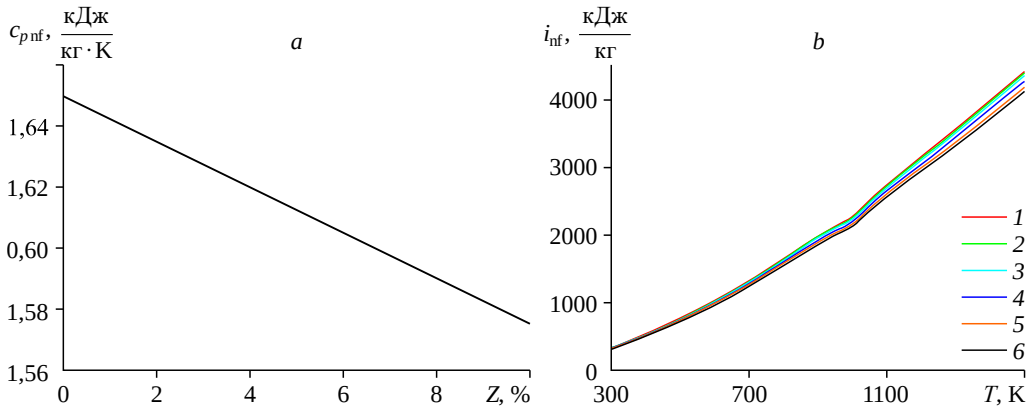


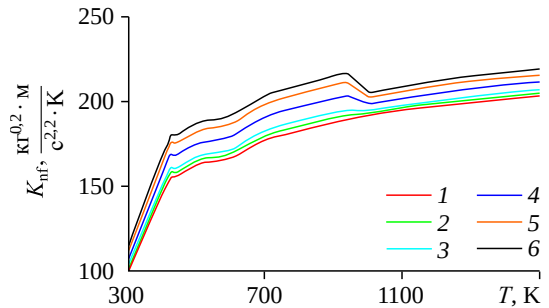
Рис. 4. Теплоемкость (a) и энтальпия (b) наносuspензии на основе н-декана в зависимости от массовой доли частиц металла.
 $Z = 0$ (1), 1 (2), 2 (3), 5 (4), 8 (5), 10 (6) %.

Рис. 5. Зависимость параметра K_{nf} от температуры.

$Z = 0$ (1), 1 (2), 2 (3), 5 (4), 8 (5), 10 (6) %.

Охлаждающая способность наносuspензии при постоянной массовой скорости оценивается по комплексу теплофизических параметров K_{nf} , который рассчитывается по соотношению [29, 30]:

$$K_{nf} = \lambda_{nf}^{0,6} \cdot \left(\frac{c_{pnf}}{\mu_{nf}} \right)^{0,4}.$$



На рис. 4 представлены зависимости теплоемкости наносuspензии на основе н-декана от массового содержания частиц металла при температуре 300 К и энтальпии от температуры.

Зависимость комплекса теплофизических параметров K_{nf} для различных значений Z от температуры приведена на рис. 5.

Падение параметра K_{nf} в районе 1000 К связано с началом фазового перехода частиц металла [25] и скачкообразным уменьшением значений теплопроводности и теплоемкости. При этом газификации н-декана не происходит, так как давление в системе охлаждения больше критического, а его теплофизические свойства определяются согласно [14]. Увеличение массовой доли частиц металла от 0 до 10 % в наносuspензии в диапазоне температур 300–1500 К приводит к росту охлаждающей способности от 7 до 15 %. Это означает, что использование наносuspензии в качестве хладагента предпочтительнее, чем чистого н-декана.

Математическая модель

Для решения тепловой задачи в стационарной постановке рассматривается цилиндрический проточный тракт из медного сплава с регенеративной системой охлаждения. Геометрия каналов охлаждения выбрана согласно данным, приведенным в [31]: толщина

огневой стенки $\delta_{\text{ст}} = 1,5$ мм, высота канала охлаждения $h_k = 3$ мм, ширина канала охлаждения $a_k = 3$ мм, количество каналов охлаждения $N_k = 260$.

При определении плотности теплового потока q использовалось уравнение сопряженного теплообмена [32]:

$$q = \frac{1}{1/\alpha_{\text{г}} + 1/\alpha_{\text{нф}} + \delta_{\text{ст}}/\lambda_{\text{ст}}} \cdot (T_{\text{г}}^* - T_{\text{нф}}),$$

где $\alpha_{\text{г}}$, $\alpha_{\text{нф}}$ — коэффициенты теплоотдачи от газообразных продуктов сгорания (ПС) к стенке и от стенки к хладагенту соответственно; $\delta_{\text{ст}}$, $\lambda_{\text{ст}}$ — толщина стенки и теплопроводность материала стенки; $T_{\text{г}}^*$ — температура торможения продуктов сгорания в проточном тракте; $T_{\text{нф}}$ — температура наносuspензии в тракте охлаждения. В расчетах отсутствует радиационная составляющая теплового потока от продуктов сгорания к стенке ввиду ее незначительного вклада (не более 5 %) в рассматриваемых условиях.

Температура торможения продуктов сгорания $T_{\text{г}}^*$ принимается постоянной по длине проточного тракта и определяется из термодинамического расчета с помощью программного комплекса ТЕРРА для условий равновесного процесса [33].

Для определения температур стенок со стороны продуктов сгорания $T_{\text{ст}}$ и со стороны хладагента $T_{\text{сж}}$ используются зависимости [31]:

$$T_{\text{ст}} = T_{\text{г}}^* - q/\alpha_{\text{г}},$$

$$T_{\text{сж}} = T_{\text{ст}} - \frac{q\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}},$$

Нагрев наносuspензии в тракте охлаждения определяется путем численного интегрирования уравнения

$$\frac{di_{\text{нф}}}{dx} = \frac{qS}{G_{\text{нф}}},$$

где S — периметр поперечного сечения проточного тракта. Здесь в выражение для q входит температура хладагента $T_{\text{нф}} = f(i_{\text{нф}})$.

Для определения коэффициента теплоотдачи от продуктов сгорания к стенке проточного тракта использовано соотношение Нуссельта — Крауссольда [29]:

$$\frac{\alpha_{\text{г}} d_{\text{э}}}{\lambda_{\text{пс}}} = 0,023 \left(\frac{4G_{\text{пс}}}{\pi d_{\text{э}} \mu_{\text{пс}}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{пс}}^{0,4},$$

где $\lambda_{\text{пс}}$, $\mu_{\text{пс}}$ — коэффициенты теплопроводности и вязкости продуктов сгорания, $G_{\text{пс}}$ — массовый расход продуктов сгорания, $d_{\text{э}}$ — эквивалентный диаметр камеры сгорания, $\text{Pr}_{\text{пс}}$ — критерий Прандтля (соответствующий параметрам в ядре потока).

Коэффициент теплоотдачи между хладагентом и стенкой цилиндрического проточного тракта определяется по полуэмпирической зависимости

$$\frac{\alpha_{\text{нф}} d_{\text{к}}}{\lambda_{\text{нф}}} = 0,023 \cdot \left(\frac{4G_{\text{нф}}}{\pi d_{\text{к}} \mu_{\text{нф}}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{нф}}^{0,4} \cdot k_{\text{р}},$$

где $d_{\text{к}}$ — эквивалентный (гидравлический) диаметр поперечного сечения канала охлаждения; $\text{Pr}_{\text{нф}}$ — критерий Прандтля для хладагента при условиях в тракте охлаждения; $k_{\text{р}}$ — коэффициент оребрения проточного тракта системы охлаждения.

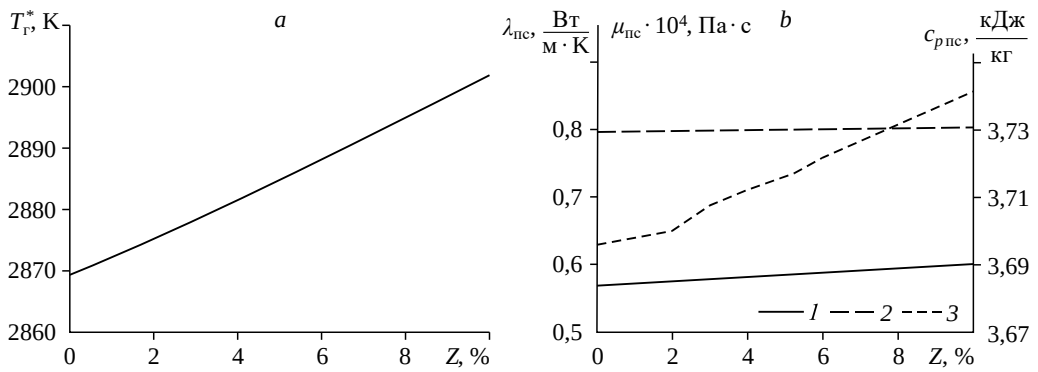


Рис. 6. Зависимости температуры торможения (а) и теплофизических свойств (b) продуктов сгорания от массовой доли частиц металла в наносuspензии: теплопроводность $\lambda_{\text{пс}}$, вязкость $\mu_{\text{пс}}$, теплоемкость $c_{p\text{пс}}$.

Результаты математического моделирования

Зависимости температуры торможения и теплофизических свойств (теплоемкость $c_{p\text{пс}}$, вязкость $\mu_{\text{пс}}$, теплопроводность $\lambda_{\text{пс}}$) равновесных продуктов сгорания от массовой доли частиц металла при $\alpha = 1$ приведены на рис. 6.

С увеличением массового содержания наночастиц металла в наносuspензии до 10 % термодинамически равновесная температура торможения продуктов сгорания в проточном тракте увеличивается на 45 К (~1,5 %) относительно случая применения чистого н-декана.

Теплопроводность и теплоемкость продуктов сгорания при добавлении в н-декан 10 % наночастиц увеличиваются на 2–3 %. При прочих равных условиях указанные факторы способствуют росту теплового потока (в пределах 14 %) от продуктов сгорания в стенку проточного тракта.

Примеры расчетных распределений температур хладагента и стенки по длине цилиндрического проточного тракта при различном массовом содержании частиц металла для крайних значений рассматриваемого диапазона расходонапряженности приведены на рис. 7.

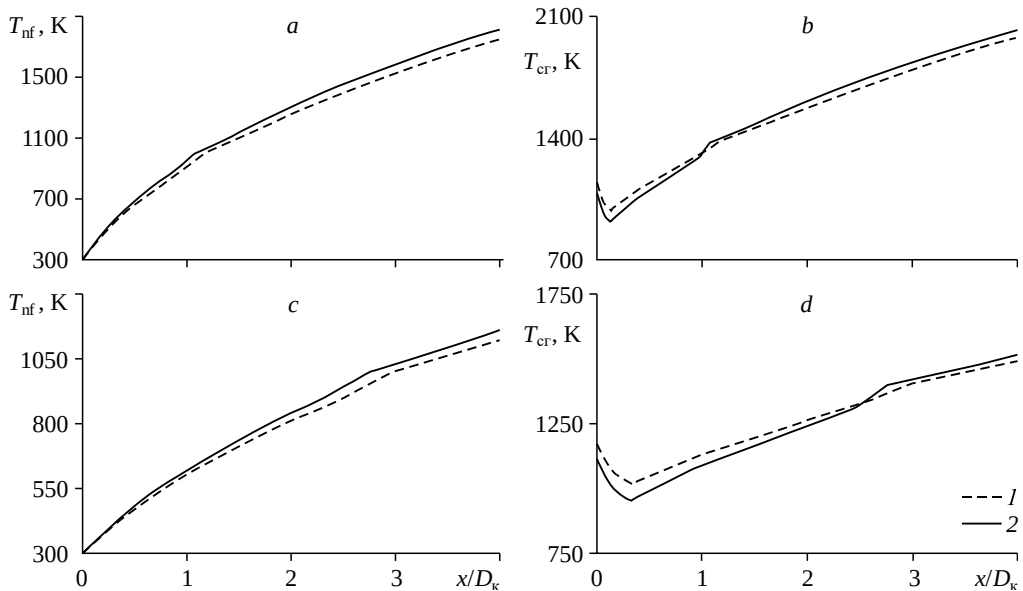


Рис. 7. Распределение температур T_{nf} и T_{cr} по длине цилиндрического проточного тракта для крайних значений расходонапряженности. $\Omega = 10$ (a, b) и 1000 (c, d) $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$; $Z = 0$ (1) и 10 (2) %.

На рис. 7 видно, что увеличение массовой доли металла Z приводит к росту температуры наносuspензии в тракте охлаждения, что связано с увеличением ее теплопроводности и уменьшением теплоемкости. Наличие локального минимума температуры стенки при $x/D = 0,1-0,3$ связано с увеличением коэффициента теплоотдачи в охладитель при повышении его температуры от начальных значений до 400 К, что объясняется изменением комплекса теплофизических свойств. При $T_{nf} < 1000$ К из-за увеличения параметра K_{nf} температура стенки канала, охлаждаемого наполненным наночастицами н-деканом, ниже, чем температура такого же канала, охлаждаемого чистым н-деканом. После того как T_{nf} приближается к значениям порядка 1000 К, наблюдается немонотонный характер кривых, связанный со скачкообразным изменением комплекса теплофизических свойств в результате фазового перехода. Из-за такого эффекта температура стенки со стороны продуктов сгорания при $Z = 10$ % начинает превышать значения T_{cr} для случая использования чистого н-декана.

Отметим, что T_{cr} не должна превышать максимально допустимую температуру эксплуатации медного сплава, равную примерно 1250 К. Отсюда следует, что применение наносuspензии в качестве хладагента в проточном тракте с регенеративной системой охлаждения представляется возможным при относительном удлинении проточного тракта до $L/D_k = 0,9$ для $\Omega = 10$ кг/(с·м²). С увеличением расходонапряженности до $\Omega = 1000$ кг/(с·м²) предельная протяженность охлаждаемого проточного тракта из медного сплава увеличится до $L/D_k = 2,1$. При этом использование наносuspензии дает возможность снизить температуру стенки со стороны продуктов сгорания по длине проточного тракта на 2 – 7 % относительно случая применения чистого н-декана.

Установлено, что зависимость температуры стенки от массовой доли наночастиц имеет локальный минимум. Так, на рис. 8 приведены зависимости относительной максимальной температуры огневой стенки от Z и Ω для проточного тракта с относительными удлинениями 0,9 и 2,1. На шкале температур $T_{ref} = 2000$ К.

Зависимость T_{cr} для каждого значения расходонапряженности Ω имеет локальный минимум, определяемый равенством $\partial T_{cr}/\partial Z = 0$. Указанное условие реализуется при значениях массовой доли наночастиц около $Z = 2-5$ % для $\Omega = 10$ кг/(с·м²) и $Z = 6-10$ % для $\Omega = 1000$ кг/(с·м²). Наличие минимума может быть объяснено двумя противодей-

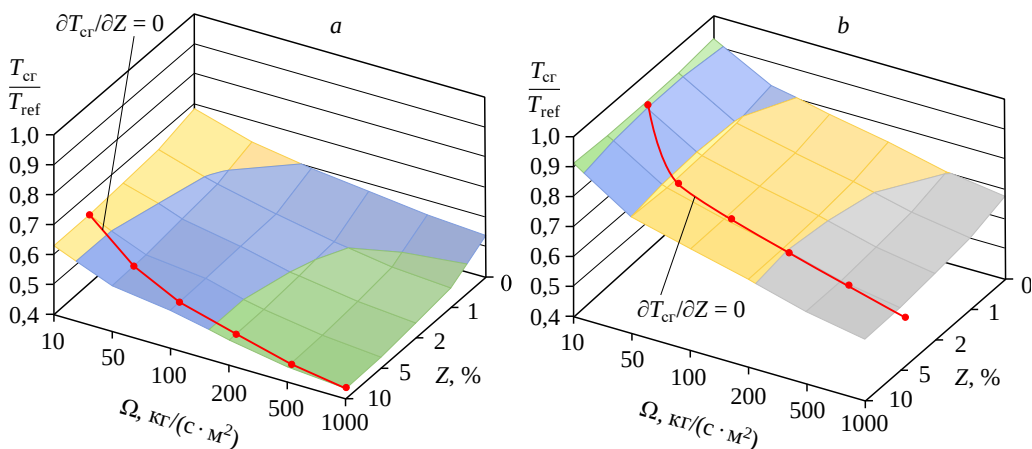
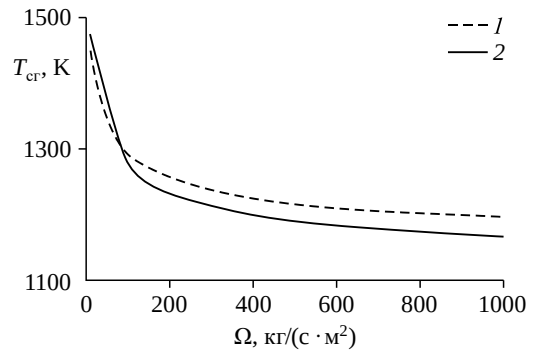


Рис. 8. Зависимости температуры стенки со стороны ПС цилиндрического проточного тракта от массовой доли наночастиц и расходонапряженности газового потока при $L/D_k = 1,5$ (а) и 3,5 (б).

Рис. 9. Зависимости максимальной температуры стенки со стороны ПС цилиндрического проточного тракта от расходонапряженности. $Z = 0$ (1) и 10 (2) %.



ствующими факторами. С одной стороны, увеличение Z приводит к росту комплекса теплофизических параметров K_{nf} и интенсификации охлаждения стенки, а с другой — к увеличению теплового потока от продуктов сгорания в стенку проточного тракта.

Дальнейший анализ теплового состояния стенки по ее максимальной температуре со стороны ПС проводился для проточного тракта с относительным удлинением $L/D_k = 1,5$. Расчетное распределение $T_{ст}$ по расходонапряженности Ω представлено на рис. 9.

Из полученных данных следует, что использование наносуспензии с массовым содержанием наночастиц 10 % при расходонапряженности газового потока $\Omega = 10\text{--}1000$ кг/(с·м²) для проточного тракта с относительным удлинением $L/D_k = 1,5$ позволяет снизить максимальную температуру стенки со стороны продуктов сгорания до 4 %.

Надо отметить, что при определенных длинах уменьшение расходонапряженности приводит к негативному влиянию на теплообмен наночастиц металла, поэтому для обеспечения эффективного регенеративного охлаждения при использовании наносуспензии необходимо подбирать оптимальное соотношение длины проточного тракта и расходонапряженности газового потока.

Выводы

В результате расчетного исследования эффективности применения суспензии на основе н-декана с наночастицами металла в качестве хладагента для регенеративной системы охлаждения модельного проточного тракта установлено следующее.

1. Увеличение массовой доли частиц металла от 0 до 10 % повышает охлаждающую способность наносуспензии K_{nf} от 7 до 15 %. При этом с увеличением массового содержания наночастиц металла в наносуспензии до 10 % термодинамически равновесная температура торможения стехиометрических продуктов сгорания в проточном тракте увеличивается на 45 K (до 2903 K) относительно случая применения чистого н-декана.

2. Допустимая температура стенки (не более 1250 K) при охлаждении рассматриваемой наносуспензией в диапазоне расходонапряженности газового потока от 10 до 1000 кг/(с·м²) может быть реализована для проточного тракта с относительным удлинением 0,9–2,1. Выявлено, что температура стенки имеет локальный минимум, который для расходонапряженности $\Omega = 10$ кг/(с·м²) реализуется при $Z = 2\text{--}5$ %, а для $\Omega = 1000$ кг/(с·м²) — при $Z = 6\text{--}10$ %.

3. Использование наносуспензии относительно чистого н-декана позволяет снизить температуру стенки со стороны продуктов сгорания от 2 до 7 % в зависимости от величины расходонапряженности и содержания частиц металла, а возможная длина охлаждаемого проточного тракта может быть увеличена до 30 %.

Полученные данные могут быть полезны при анализе и последующем экспериментальном исследовании охлаждаемых проточных каналов энергетических установок в части обеспечения допустимого теплового состояния элементов конструкции.

Список литературы

1. Савельев А.М., Брайнин Б.И., Старик А.М. Анализ энергетической эффективности использования комбинированных углеводородных топлив с включением неметаллических и металлических наноконпонентов в реактивных двигателях // Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и новые принципы организации горения / Под ред. А.М. Старика. М.: Торус Пресс, 2011. С. 669–695.
2. Терехов В.И., Калинин С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножижкостях: современное состояние проблемы (обзор). Ч. 1. Синтез и свойства наножижкостей // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 1. С. 1–15.
3. Рудяк В.Я., Минаков А.В., Краснолуцкий С.Л. Физика и механика процессов теплообмена в течениях наножижкостей // Физ. мезомеханика. 2016. Т. 19, № 1. С. 75–83.
4. Слободина Е.Н., Михайлов А.Г., Подлипский И.А. Наножижкости: перспективы применения в источниках теплоты // Актуальные вопр. энергетики. 2022. Т. 4, № 1. С. 20–24.
5. Макеев А.Н., Кирюхин Я.А. Проблемы и перспективы использования наножижкостей в теплоэнергетике // Вестн. Дагест. гос. техн. ун-та. Техн. науки. 2022. Т. 49, № 3. С. 24–31.
6. Штрехер М.С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1976. 304 с.
7. Allen C., Mittal G., Chih-Jen Sung, Toulson El., Lee T. An aerosol rapid compression machine for studying energetic-nanoparticle-enhanced combustion of liquid fuels // Proc. of the Combustion Inst. 2011. Vol. 33. P. 3367–3374.
8. Jackson D., Davidson D., Hanson R. Application of an aerosol shock tube for the kinetic studies of n-dodecane/nano-aluminum slurries // 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibit. 21–23 July 2008. Hartford, CT. Article 4764.
9. Savel'ev A.M., Smirnov V.V., Titova N.S., Yagodnikov D.A. Diffusion combustion of n-decane with unpassivated aluminum nanoparticles additives: Analysis of mechanism and numerical simulation // Combust. Flame. 2022. Vol. 236. P. 111761–1–111761–18.
10. Javed I., Baek S., Waheed K. Autoignition and combustion characteristics of kerosene droplets with dilute concentrations of aluminum nanoparticles at elevated temperatures // Combust. Flame. 2015. Vol. 162. P. 774–787.
11. Yoon J., Baek S. Droplet evaporation behavior of kerosene/nano-aluminum fuels at high pressure environment // Intern. J. Material and Mech. Engng. 2015. Vol. 4. P. 44–49.
12. Luo Y., Xu X., Zou J., Zhang X. Combustion of JP-10-Based Slurry with nanosized aluminum additives // J. Propul. Power. 2016. Vol. 32. P. 1167–1177.
13. Palaszewski B., Jurns J., Breisacher K., Kearns Kimberly A. Metallized gelled propellants combustion experiments in a pulse detonation engine // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibit, 2004. Hartford, CT. Article 4191.
14. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
15. Эндотермические топлива и рабочие тела силовых и энергетических установок / Л.С. Яновский, Т.Н. Шигабиев, Ф.М. Галимов, В.Ф. Иванов. Казань: Изд. РАН, 1996. 264 с.
16. Рудяк В.Я. Современное состояние исследований вязкости наножижкостей // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. 2015. Т. 10, № 1. С. 5–22.
17. Фомин А.А., Фомина Л.Н. Анализ эмпирических корреляций теплофизических свойств водных суспензий наночастиц оксида алюминия // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 28, № 2. С. 169–188.
18. Rudyak V.Ya., Belkin A.A., Tomilina E.A., Egorov V.V. Nanoparticle friction force and effective viscosity of nanosuspensions // Diffus. and Defect Data. Pt A Defect and Diffus. Forum. 2008. Vols. 273–276. P. 566–571.
19. Терехов В.И., Калинин С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножижкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 2. С. 173–188.
20. Bashirnezhad K., Bazri S., Safaei M.R. et al. Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies // Intern. Commun. Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 73. P. 114–123.
21. Safiei W., Rahman M., Kulkarni R. et al. Thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids: a review // J. Advanced Res. Fluid Mech. and Thermal Sci. 2020. Vol. 74, Iss. 2. P. 66–84.
22. Рудяк В.Я., Минаков А.В., Пряжников М.И. Теплофизические свойства наножижкостей и критерии подбора // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 24. С. 9–16.
23. Keblinski P., Prasher R., Eapen J. Thermal conductance of nanofluids: is the controversy over // J. Nanopart Res. 2008. Vol. 10. P. 1089–1097.

24. Рудяк В.Я., Краснолуцкий С.Л. Моделирование коэффициента теплопроводности наножидкости с малыми частицами методом молекулярной динамики // Журн. техн. физики. 2017. Т. 87, № 10. С. 1450–1458.
25. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
26. Бардаханов С.П., Новопашин С.А., Серебрякова М.А. Исследование теплопроводности наножидкостей на основе наночастиц оксида алюминия // Наносистемы: физика, химия, математика. 2012. Т. 3, № 1. С. 27–33.
27. Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C. Determination of the effective thermal diffusivity of nanofluids by the double hot-wire technique // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. Vol. 39. P. 5316–5322.
28. Patel H.E., Sundararajan T., Das S.K. An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids // J. Nanopart Res. 2010. Vol. 12. P. 1015–1031.
29. Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А. и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. Кн. 2. Учебник для авиац. спец. вузов / Под ред В.М. Кудрявцева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1993. 368 с.
30. Александренков В.П. Расчет наружного проточного охлаждения камеры ЖРД [Электронный ресурс]: электронное учеб. изд.: метод. указания к домашнему заданию по дисциплине «Теплозащита и прочность конструкций ЖРД». М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): ил.; 12 см.
31. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: Учебник для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / Под ред. Д.А. Ягодникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 488 с.
32. Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В. Исследование эффективности регенеративной системы охлаждения сверхзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей на углеводородном горючем // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6, № 11. С. 489–495.
33. Трусов Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Междунар. симпозиум Горение и плазмохимия. (Алматы, Казахстан, 24–26 авг. 2005). Алматы: Казак университеті, 2005. С. 52–57.

*Статья поступила в редакцию 8 июня 2022 г.,
после доработки — 3 мая 2023 г.,
принята к публикации 16 июня 2023 г.*