

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ

Инж. ОБУХОВ Д. С.

Камский государственный политехнический институт

Реактивные топлива для высокоскоростных самолетов являются единственным охладителем, обеспечивающим штатный температурный режим силовой установки и элементов летательных аппаратов [1]. Однако топлива для охлаждения используются лишь в жидкой фазе, что ограничивает реализуемый хладоресурс. Существенный прирост хладоресурса может быть достигнут за счет теплоты парообразования топлива. Чтобы использовать кипящие топлива для охлаждения двигателей, требуется решить ряд задач, одна из которых – определение закономерностей теплоотдачи при кипении топлив [2].

Реактивные топлива представляют собой сложные многокомпонентные смеси углеводородов. В настоящее время для бинарных систем имеются некоторые расчетные рекомендации. Их суть заключается в том, что, вводя в известные уравнения для однокомпонентных жидкостей концентрационные критерии, авторы учитывают влияние состава системы на коэффициент теплоотдачи. Такой метод применим только для бинарных и тройных систем, хотя в последнем случае уже создаются определенные трудности, так как расчетная зависимость принимает довольно громоздкий вид. Этот метод не приемлем для сложных, многокомпонентных систем, каковыми являются различные топлива, вакуумные масла и т. п., в связи с тем, что для рассматриваемых систем трудно определить даже первоначальный компонентный состав, ибо это в случае рассмотрения продуктов переработки нефти зависит от природы самой нефти и технологии ее переработки. При обобщении опытных данных по теплоотдаче при кипении подобных систем ограничиваются в основном эмпирическими зависимостями. Существенное препятствие при анализе результатов измерения – отсутствие надежных значений теплофизических свойств смесей.

Несмотря на то, что углеводородные топлива как кипящие жидкости обладают рядом особенностей, при их кипении имеют место те же режимы теплообмена, что и при кипении других жидкостей, например воды. С учетом изложенного выше можно предположить, что в условиях нестационарного обогрева закономерности кипения керосина будут теми же, что и для обычных жидкостей, но количественные характеристики теплоотдачи – иными.

Чтобы правильно учитывать особенности теплообмена и возникновения кризиса кипения при набросе тепловой нагрузки в условиях вынужденной конвекции, необходимо их исследовать в первую очередь при естественной конвекции.

Первая эмпирическая зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении керосина опубликована в [3] для диапазона давлений 0,1–10 бар. По мнению автора, в настоящее время четко определились коллективы ученых, занимающиеся исследованием тепломассообмена кипящих реактивных топлив. Это сотрудники ЦИАМ, КГТУ–КХТИ, КГТУ–КАИ и КВАУ.

В [4] представлены результаты исследования теплоотдачи при кипении в большом объеме топлив РТ и Т-6 в диапазоне давлений 0,1–0,31 МПа, заметно различающихся по физико-химическим показателям. Результаты экспериментов по кипению обескислороженных топлив описаны соотношением

$$\alpha = 0,52q^{0,736}p^{0,27} \quad (\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); q, \text{Вт}/\text{м}^2; p, \text{бар}).$$

Автор [5] защищает экспериментальные результаты (по α в диапазоне давлений 1–11 бар для топлив ТС-1, РТ и Т-8, для топлива Т-8В – 1–10 бар, а для Т-6 – 1–6 бар) и обобщение измерений, выполненное в три этапа. Сначала проведено обобщение с помощью эмпирической формулы вида $\alpha = Aq^n$ и таблицы коэффициентов этой зависимости, затем проведено сопоставление α с уравнением для однокомпонентных жидкостей, полученным Д. А. Лабунцовым, и третья стадия заключалась в получении обобщенной зависимости, описывающей результаты измерений α для всех исследованных топлив с наименьшей погрешностью ($\pm 11\%$):

$$\text{Nu}^* = [0,02 + K^{0,6}] \text{Re}_*^{0,7},$$

где $K = r\rho''/(c_p T_s \rho')$ – число подобия фазового превращения, в качестве определяющего размера используется величина, пропорциональная критическому радиусу пузырька $l^* = c_p \rho \sigma T_s (r\rho'')^{-2}$.

В [2] тот же массив экспериментальных данных обобщен с высокой точностью (среднеквадратичное отклонение – менее 5 %) полуэмпирической зависимостью следующего вида:

$$\tilde{\alpha} = 0,141B^{0,106},$$

где $\tilde{\alpha} = \alpha(\nu\sigma T_s)^{1/3}(\lambda q)^{-2/3}$; $B = r(\nu\rho'')^{3/2}/(\sigma(\lambda T_s)^{1/2})$.

В [6] публикуются экспериментальные данные для кипения при докритических давлениях и псевдокипения при сверхкритических давлениях для реактивных топлив ТС-1 и нафтила (обнаруживается режим теплосъема – псевдокипение для области сверхкритических давлений и докритических температур, в которой с термодинамической точки зрения вещество может находиться только в виде однофазной капельной жидкости [7]).

На рис. 1 приведены экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении углеводородных топлив. Влияние подогрева предлагается учитывать в виде функции числа Якоби $f(\text{Ja}^{\text{нед}}) = \alpha_{\text{нед}}/\alpha_{\text{нас}} = ((\rho' - \rho'')/\rho')^{\text{Ja}^{\text{нед}}}$ [8].

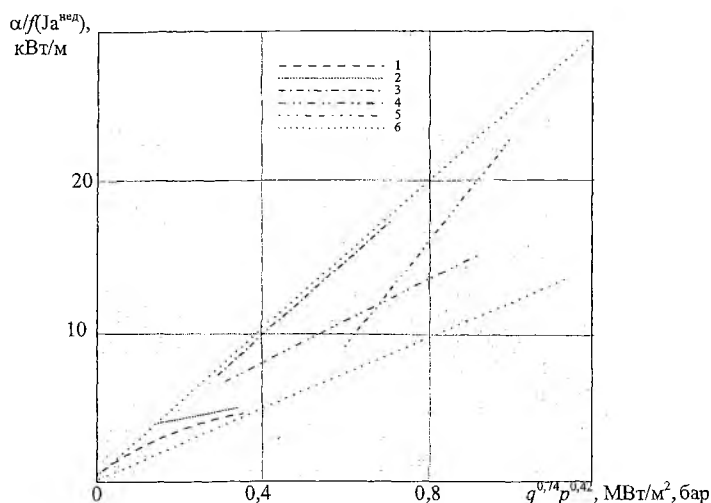


Рис. 1. Экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении углеводородных топлив: 1 – данные КГТУ–КХТИ, ЦИАМ [2]; 2–5 – данные КВАУ, соответственно: 1, 6, 12, 18 бар [6]; 6 – границы зависимости С. С. Кутателадзе [3]; 1–6 – ТС-1; 1 – ТС-1, РТ, Т-8, Т-6, Т-8В

ВЫВОДЫ

1. Полученные экспериментальные данные и обобщения по теплоотдаче к кипящим реактивным топливам в условиях естественной конвекции при докритическом давлении не выходят за границы зависимости, предложенной С. С. Кутателадзе (рис.1).

2. Теплообмен при нестационарном тепловыделении не исследовался вовсе, хотя в аварийных ситуациях в системе охлаждения двигателей, в «баковых задачах» они явно имеют место, при этом тепловые нагрузки могут превышать критические в сотни раз.

3. Возникает необходимость дальнейшего исследования теплообмена при кипении углеводородных топлив, в первую очередь в условиях резкого нестационарного тепловыделения при нагрузках, многократно превышающих критические.

Обозначения

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К); p – давление, МПа; q – плотность теплового потока, Вт/м²; $Nu^* = \alpha l^*/\lambda^*$ – число Нуссельта; $Re^* = w l^*/\nu$ – число Пекле; $Ja^{нед} = c_p r' \Delta T_{нед} / (r \rho'')$ – число Якоби; r – теплота парообразования, Дж/кг; ρ – плотность, кг/м³; T – температура, К (°С); c – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); $l^* = c \rho' \sigma T_{пов} (r \rho'')^{-2}$ – безразмерная длина; $\tilde{\alpha} = \alpha (\nu \sigma T_{нас})^{1/3} (\lambda q)^{2/3}$ – безразмерный коэффициент теплоотдачи; $B = r (\nu \rho')^{3/2} / (\alpha (\lambda T_{нас})^{1/2})$ – безразмерный комплекс; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); КВАУ – Казанский военный артиллерийский университет; КГТУ–КАИ – Казанский государственный технический университет – Казанский авиационный институт; КГТУ–КХТИ – Казанский государственный технологический университет – Казанский химико-технологический институт; ЦИАМ – Центральный институт авиационного моторостроения.

Нижние индексы

p – при постоянном давлении; s – условие насыщения.

Верхние индексы

' – относится к жидкости; '' – к пару.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фаворский О. Н., Курзинер Р. И. Развитие воздушно-реактивных двигателей для авиации высоких скоростей полета – синтез достижений различных отраслей науки и техники // ТВТ. – 1990. – Т. 28, № 4. – С. 793–803.
2. Теплообмен при пузырьковом кипении реактивных топлив / В. В. Ягов, Л. С. Яновский, Ф. М. Галимов, А. В. Тимошенко // ТВТ. – 1994. – Т. 32, № 6. – С. 867–872.
3. Кутателадзе С. С. Основы теории теплопередачи при изменении агрегатного состояния вещества. – Л.: Машгиз, 1939. – 136 с.
4. О некоторых особенностях теплоотдачи при кипении углеводородных топлив в большом объеме / С. В. Головин, И. Х. Хайруллин, Т. Н. Шигабиев, Л. С. Яновский // ИФЖ. – 1990. – Т. 59, № 4. – С. 583–586.
5. Галимов Ф. М. Теплоотдача при кипении реактивных топлив в условиях естественной конвекции: Дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 1991. – 174 с.
6. Особенности теплоотдачи к жидким углеводородным охладителям в условиях естественной конвекции при до- и сверхкритических давлениях / В. А. Алтунин, О. Х. Ягофаров, М. Е. Зарифуллин, Ш. Я. Замалтдинов // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1998. – № 1. – С. 59–67.
7. Алемасов В. Е., Дрегаллин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей / Под ред. В. П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.
8. Обухов С. Г. Теплообмен при кипении в условиях «наброса» тепловой мощности // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1992. – № 4. – С. 74–77.

Представлена кафедрой
электротехники и электроники

Поступила 20.04.2005

УДК 614.715.621.311.22

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОТЕЛЬНОМИ АГРЕГАТАМИ

Канд. техн. наук, доц. НАЗАРОВ В. И.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время разработан ряд технических мероприятий, направленных на снижение выбросов токсичных веществ, но все они приводят к снижению экономичности работы котельных агрегатов, что не способствует их широкому внедрению, особенно в условиях повышения цен на топливо. Поэтому поиск решений, направленных на наиболее эффективное применение мероприятий по снижению токсичных выбросов от котельных агрегатов, является первоочередной и актуальной задачей.

При горении углеводородных топлив в продуктах сгорания содержатся, помимо нетоксичных диоксида углерода CO_2 и водяного пара H_2O , токсичные вещества: оксид углерода CO , оксиды серы SO_2 и SO_3 , оксиды азота NO и NO_2 , летучая зола, сажеобразные вещества, а также канцерогенные углеводороды. На данном этапе наибольшие усилия в практике энергетики направлены на уменьшение в основном двух компонент: CO и NO_x . Это объясняется тем, что указанные компоненты могут успешно подавляться посредством режимных мероприятий, а значит, не требуют существенных