УДК 536.24

ТЕПЛОМАССООБМЕН В КАНАЛАХ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА

Дзюбенко Б.В., Мякочин А.С., Щербакова Н.У.

Московский авиационный институт (государственный технический университет) Москва, Россия

Данная работа осуществлена при поддержке РФФИ (грант № 10-08-00712а) и государственной поддержки ведущих научных школ России (НШ-8610.2010.8)

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследований тепломассообмена в пучках витых труб и твэлов космической ядерной энергодвигательной установки. Неравномерность объемного энерговыделения в ядерном реакторе формирует неравномерности полей температур и скоростей, которые выравниваются путем интенсификации процессов переноса. Изучение тепломассообмена выполнено оригинальными методами зонного нагрева и диффузии тепла от точечного источника. При обобщении опытных данных использовалась модель течения гомогенизированной среды. Установлено, что пучки витых твэлов и труб позволяют интенсифицировать тепломассообмен и выравнить неравномерности полей температуры в поперечном сечении пучка. Разработаны методы расчета процессов тепломассообмена с учетом межканального перемешивания теплоносителя и эффектов нестационарности.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время рассматриваются различные варианты интенсивного развития космической технологии на основе ядерных источников энергии [1, 2]. Наиболее предпочтительным вариантом ядерной энергодвигательной установки (ЯЭДУ) является ядерная установка на основе ядерного ракетного двигателя (ЯРД), имеющего достаточно глубокое теоретическое и экспериментальное обоснование [1]. При этом используется концепция модульного построения ЯЭДУ с заданной суммарной тягой ≈200кН для увеличения надежности установки. Для связки из 3-4 ЯРД тяга единичного ЯРД составляет 50-70 кН. Для обеспечения высокой экономичности и ресурса ЯРД должны применяться твэлы на основе карбидов тугоплавких металлов и углеродосодержащая ингибирующая присадка к рабочему телу - водороду, а конструкция тепловыделяющих сборок (ТВС) и твэлов должны обеспечивать существенную интенсификацию процессов тепломассообмена для выравнивания неравномерностей полей температур и скоростей теплоносителя, сформированных неравномерным полем тепловыделения, характерным для транспортных реакторов малых размеров. В работах [1, 2] была рассмотрена ядерная энергодвигательная установка, где используются тепловыделяющие сборки с пучками витых тепловыделяющих элементов (твэлов), которые позволяют нагреть рабочее тело - водород до температуры 3000-3100 К и обеспечить удельный импульс тяги до 9,5-10 км/с и безопасную работу многоразовой ЯЭДУ на различных режимах. Это связано с тем, что в пучках витых твэлов за счет закрутки потока можно существенно интенсифицировать процессы тепломассообмена при соответствующем выборе шага закрутки профиля твэла и уменьшить температуру стенки твэлов при заданном тепловом потоке с поверхности твэлов. Целью статьи является обобщение данных по тепломассообмену в пучках витых твэлов и труб, которые позволяют существенно уменьшить массу, габариты, металлоемкость и стоимость изготовления теплообменных устройств [1-4]. При этом гарантированное взаимное касание витых труб в плотных пучках позволяет избежать возникновения вибраций и повысить надежность конструкции ЯЭДУ. Интенсификация массообмена за счет вихревого течения внутри витых труб и в межтрубном пространстве пучка также существенно уменьшает интенсивность образования осадков на теплопередающих поверхностях и операционные расходы на периодическую очистку ТА, что позволяет с успехом использовать эти ТА в различных областях техники.

© Дзюбенко Б.В., Мякочин А.С., Щербакова Н.У.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В каналах, образованных пучками витых твэлов и труб овальной формы наблюдается сложное пространственное течение теплоносителя с закруткой потока. Выполненные исследования турбулентной структуры потока в пучках витых труб и твэлов и предложенная модель течения, описываемая системой уравнений, поддающейся численному решению позволили разработать методы расчета стационарных и нестационарных теплогидравлических задач [2, 3]. Разработанная модель течения гомогенизированной среды заменяет течение в реальном пучке витых стержней потоком двухфазной среды с неподвижной твердой фазой, в котором по определенному закону распределены источники объемного тепловыделения q_v и гидравлического сопротивления $\xi\rho u/2d_{eq}$, где ξ - коэффициент гидравлического сопротивления. Принимается, что вектор скорости потока параллелен оси пучка, градиент давления в поперечном сечении пучка равен нулю, а диффузионные члены в уравнениях энергии и движения учитывают влияние различных механизмов переноса в пучке витых твэлов или труб [2, 3].

Система уравнений, описывающая турбулентное течение в пучках витых твэлов с учетом влияния межканального перемешивания теплоносителя и эффектов нестационарности на поля температур теплоносителя и витых твэлов (твердой фазы) при использовании двухтемпературной модели течения гомогенизированной среды в предположении, что возмущения параметров, определяющих процесс течения невелики, а их длительность значительно превосходит время распространения звуковой волны по длине пучка, для нестационарной осесимметричной задачи имеет вид:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = q_v - \frac{4\alpha\varepsilon}{d_{eq}(1-\varepsilon)}(T_s - T) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_{sr}\frac{\partial T_s}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(r\lambda_{sx}\frac{\partial T_s}{\partial x}\right), \quad (1)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{4\alpha}{d_{eq}}(T_s - T) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_{eff}\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{eff}\frac{\partial T}{\partial x}\right) \quad (2)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \xi\frac{\rho u^2}{2d_{eq}} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\rho r \nu_{eff}\frac{\partial u}{\partial r}\right) \quad (3)$$

$$G(\tau)=2\pi\int_0^{r_k}\varepsilon\rho u r dr \quad (4)$$

$$p=\rho RT \quad (5)$$

где c - теплоемкость; d_{eq} - эквивалентный диаметр; G - массовый расход теплоносителя; p - давление; r - радиальная координата; T - температура; u - продольная скорость; x - продольная координата; α - коэффициент теплоотдачи; ε - пористость пучка по теплоносителю; λ - теплопроводность; ν - кинематическая вязкость; λ - плотность; ν - время. Индексы: b - среднемассовый; eff - эффективный; eq - эквивалентный; p - при давлении P=const, r - по оси r; s - твердая фаза; x - по оси x.

Эта система уравнений позволяет рассчитать поля температур при нестационарных теплогидравлических процессах как в моделях пучков витых труб (стержней) при их нагреве электрическим током, так и в ТВС с витыми твэлами при математическом моделировании переходных процессов в гетерогенном ядерном реакторе, который в этом случае заменяется на эквивалентный гомогенный реактор, к которому затем применяется диффузионная теория, а к системе уравнений присоединяются уравнения, описывающие кинетику реактора с учетом запаздывающих нейтронов и обратных связей по температурному и плотностному эффектам реактивности [2]. Методы численного расчета системы уравнений (1)-(5) изложены в работах [2, 3].

МЕТОДЫ ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Целями экспериментальных исследований были:

- экспериментальное обоснование модели течения гомогенизированной среды, ее математического описания и методов расчета путем сопоставления теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных полей температур и скоростей теплоносителя и исследования структуры потока;
- получение замыкающих экспериментальных зависимостей в критериальной форме для расчета коэффициентов теплоотдачи, гидравлического сопротивления и эффективных коэффициентов турбулентной диффузии, а также определение областей режимных и геометрических параметров, где обеспечивается максимальная эффективность от применения метода интенсификации тепломассообмена путем закрутки потока;
- комплексные исследования тепломассообмена на электронагреваемых установках

при моделировании неравномерного поля тепловыделения в поперечном сечении пучка.

Методы исследования и экспериментальные установки для изучения процессов тепломассообмена в пучках витых труб имели ряд специфических особенностей (рис.1).

Так, для исследования структуры потока в пучках витых труб в условиях стесненного пространства и высокой интенсивности турбулентности методом термоанемометра постоянной температуры возникла необходимость уточнить термоанемометрическое уравнение, настроить аппаратуру на более широкий спектр частот, а также разработать специальную конструкцию термоанемометрических зондов.

Для исследования перемешивания теплоносителя в пучке витых труб был разработан метод зонного нагрева, который заключался в нагреве группы труб для создания неравномерного поля тепловыделения и измерении сформированных им полей температуры теплоносителя, которые сопоставлялись с теоретически рассчитанными полями температур.

Метод диффузии тепла от точечного источника для определения эффективного коэффициента диффузии был усовершенствован с учетом особенностей конструкции пучка витых труб. Диаметр источника диффузии был выбран равным диаметру витой трубы, чтобы учесть все механизмы переноса, действующие на индикаторный газ, вдуваемый в основной поток. Исследования теплообмена при зонном нагреве пучка витых труб велись методом локального подобия. Коэффициент теплоотдачи определялся по измеренным локальным температурам стенки, температурам теплоносителя, скоростям потока на внешней границе пристенного слоя и плотностям теплового потока [2, 3].

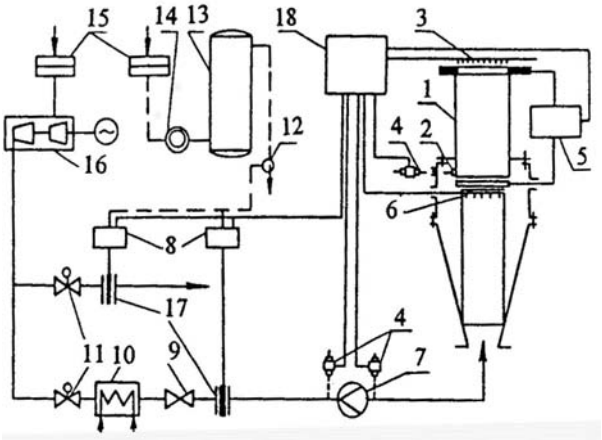

Рис.1 Схема экспериментальной установки: 1 - экспериментальный участок; 2 - отбор статического давления; 3 - координатный механизм с гребенкой термопар; 4 - датчик для измерения давления; 5 - электрогенератор; 6 - термопары; 7 - расходомерное сопло; 8 - управляющий привод; 9 - кран; 10 - холодильник; 11 - регулируемые задвижки; 12 - редуктор; 13 - ресивер; 14 -компрессор; 15 - фильтр; 16 - турбокомпрессор; 17 - устройство для измерения расхода; 18 - автоматизированная система управления и сбора опытных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективные коэффициенты турбулентной теплопроводности λ_{eff} и вязкости υ_{eff}, входящие в уравнения энергии (2) и движения (3) и используемые для замыкания системы уравнений (1) - (5), определялись экспериментально для стационарного течения и для каждого из рассматриваемых типов нестационарности. При этом предполагалось, что турбулентные числа Прандтля и Льюиса равны единице: $P_{rm}=\rho\upsilon_{eff}c_p/\lambda_{eff}=1$, $Le_m=\rho D_{eff}c_p/\lambda_{eff}=1$, где D_{eff} - эффективный коэффициент турбулентной диффузии или в безразмерном виде: $K = D_{eff}/ud_{eq}$. Коэффициенты λ_{eff} и υ_{eff} определялись в каждый момент времени и для каждой точки пространства: $\lambda_{eff}=K\rho uc_pd_{eq}$, $\upsilon_{eff}=Kud_{eq}$. Коэффициент K описывает переносные свойства турбулентного потока во времени, но является неизменным для рассматриваемой области течения в фиксированный момент времени τ при заданном шаге закрутки витых труб, а параметры ρ, u и c_p зависят как от времени, так и от пространственного положения расчетной ячейки. При этом предполагается зависимость в каждый фиксированный момент времени коэффициентов переноса λ_{eff} и υ_{eff} от производных некоторых эффективных средних значений температур и скоростей в потоке с закруткой потока, где существенна диффузия турбулентности и ее конвективной перенос со средней скоростью потока. Этот метод замыкания системы исходных

уравнений с помощью экспериментально определяемых коэффициентов λ_{eff} и υ_{eff}, основанный на использовании гипотезы о локальном подобии и формально-математическом подходе, обоснован экспериментально.

При стационарных режимах безразмерный эффективный коэффициент турбулентной диффузии в пучках витых стержней является функцией критериев подобия, характеризующих особенности течения в ТВС $K_{qs}=K(Fr_m,Re,\varepsilon)$, где критерий $Fr_m=s^2/dd_{eg}$ характеризует действие закрутки потока на его переносные свойства (рис.2),

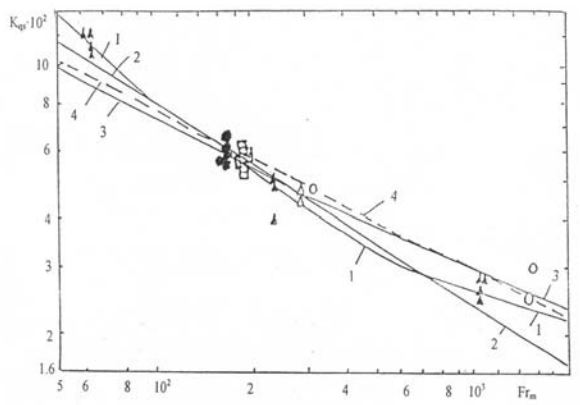

Рис.2 Зависимость коэффициента K_{qs} от интенсивности закрутки потока (F_{rm}) при $Re\geq 8\cdot 10^3$:1-4 - зависимости (6), (7), (8), (9); 5-7 - опытные данные для прямых пучков витых труб; 8-9 -то же для закрученных пучков витых труб.

$Re=u_m d_{eq} p/\mu$ - критерий Рейнольдса, который при $Re>8\cdot 10^3$ практически не влияет на коэффициент K_{qs}, и ε - пористость пучка по теплоносителю:

$$K_{qs}=10.35Fr_m^{-1.4232+0.1857lgFrm} \quad (6)$$

$$K_{qs}=0.902Fr_m^{-0.53}\varepsilon^{1.086} \quad (7)$$

$$K_{qs}=0.136Fr_m^{-0.256}+10Fr_m^{-0.66}(\varepsilon-0.46) \quad (8)$$

$$K_{qs}=0.078484Fr_m^{-0.254}(1+8.1Fr_m^{-0.278}) \quad (9)$$

В случае нестационарного протекания теплогидравлических процессов в пучке витых твэлов эффективный коэффициент турбулентной диффузии K_{un} зависит также от критерия Фурье $Fo_b=\lambda_b\tau/(c_p\rho_b d_k^2)$, где индекс *b* означает, что критерий определен при среднемассовой температуре теплоносителя, и безразмерного, параметра G_2/G_1, представляющего собой отношение расхода теплоносителя после внесения возмущения (G_2) к первоначальному расходу теплоносителя (G_1) через пучок стержней: $K_{un}=K(Fr_m,Fo_b,Re,G_2/G_1,\varepsilon)$. При обобщении опытных данных по коэффициенту K_{un} использовался относительный коэффициент нестационарного перемешивания (рис.3)

$$\kappa=K_{un}/K_{qs}=f(Fo_b,Re,G_2,/G_1,Fr_m):$$

$$\kappa=1-1,364\cdot 10^3 Fo_b \quad (10)$$

$$\kappa=4,04Fo_b^{1,852-0,927G_2/G_1}+[0,9-4,12(G_2/G_1-1)3,8] \quad (11)$$

$$\kappa=AFo_b^n+C \quad (12)$$

$$k_1=\kappa/[0,993+2,95\cdot 10^{-4}(G_2/G_1)^{-11,94}] \quad (13)$$

$$k_2=\kappa/[0,04+0,645(G_2/G_1)^{-0,818}] \quad (14)$$

$$\kappa=(1+927Fo_b)\,[2,95\cdot 10^4\,(G_2/G_1)^{-11,94}+0,993] \quad (15)$$

$$\kappa=(2,57Fo_b^{-0,0437}-2,11)\cdot[2,95\cdot 10^{-4}(G_2/G_1)^{-11,94}+0,993] \quad (16)$$

$$\kappa=(0,398Fo_b^{-0,165}+0,13)\cdot[0,645(G_2/G_1)^{-0,818}+0,04] \quad (17)$$

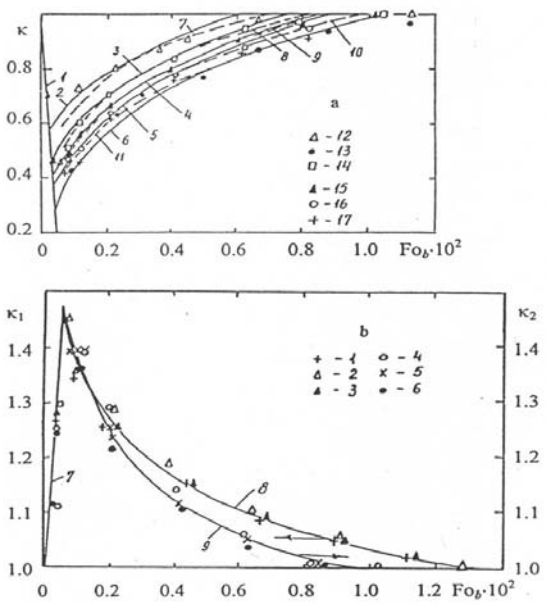

Рис.3 Влияние нестационарности процесса межканального перемешивания в пучке витых труб на коэффициенты переноса при ускорении (a) и замедлении (b) потока теплоносителя во времени: a) 1 – (10); 2-6 – (11); 7-11 – (12); 12-17 – опытные данные; b) (13); (14); 1-3 – эксперимент при Fr_m=57 и G_2/G_1=0,605, 0,665 и 0,765; 4-6 – эксперимент при Fr_m=220 и G_2/G_1=0,579, 0,594 и 0,611; 7 – (15); 8 – (16) для Fr_m=57; 9 – (17) для Fr_m=220

Использование метода интенсификации теплообмена путем закрутки потока позволило решить проблему создания высокотемпературных тепловыделяющих сборок (ТВС) газоохлаждаемого гетерогенного ядерного реактора, предназначеного для энергодвигательной установки (ЯЭДУ) космических аппаратов [1, 2], твэлы и ТВС которого должны обладать высокой надежностью и способностью работать длительное время при высоких температурах и плотностях теплового потока в водородной среде при многократных сменах режима работы. В пучке витых твэлов неравномерности полей скорости и температуры, сформированные входными узлами ТВС и неравномерным полем тепловыделения, выравниваются за счет межканального перемешивания и выравнивающего действия гидравлического сопротивления пучка.

На основе численного моделирования переходных процессов в реакторе ЯЭДУ были определены оптимальные законы изменения реактивности реактора для обеспечения быстрого перехода с энергетического к двигательному режиму работы и обратно при условии выполнения ограничения по ядерной безопасности и термопрочности витых твэлов из карбидов тугоплавких металлов [2, 3].

В результате экспериментальных и теоретических исследований полей скорости и температуры были выбраны варианты проточной части ТВС ЯЭДУ, при которых обеспечивается благоприятный теплосъем с твэлов всех нагревных секций при обеспечении заданных выходных параметров теплоносителя. Результаты исследования тепломассообмена использовались для оценки эффективности теплообменных аппаратов [1, 4] (рис.4).

Применение витых труб в теплообменных аппаратах существенно уменьшает их массу, габариты, металлоемкость и стоимость изготовления, а за счет гарантированного взаимного касания витых труб в плотных пучках - существенно снижает вероятность возникновения вибраций и повышает надежность. На рис.4 числа Нуссельта $Nu=\alpha d_{eq}/\lambda$ и коэффициенты гидравлического сопротивления ξ для интенсифицированных каналов отнесены к числу Нуссельта для круглых труб $Nu_{гл}$ и коэффициенту трения $\xi_{гл}$, соответственно.

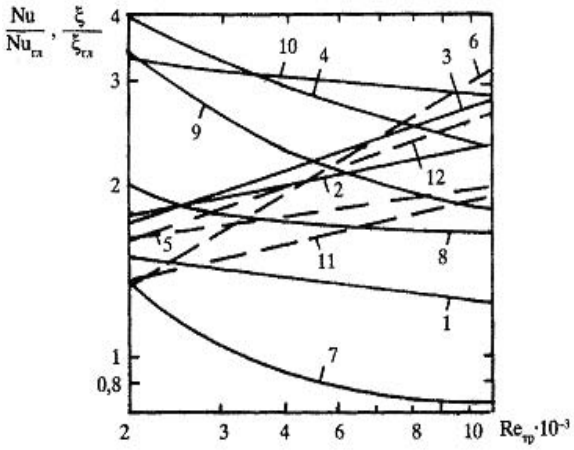

Рис.4 Сравнение теплогидравлической эффективности различных теплопередающих поверхностей при течении внутри труб и в пучке витых труб: 1-3 - зависимости $Nu/Nu_{гл}$ для витых труб с s/d=6.2; гладкой, с винтовой и кольцевой накаткой. 4 - то же для пучка гладких витых труб с s/d=6.2; 5. 6 - то же для круглых труб с винтовой и кольцевой накаткой соответственно: 7-12 - зависимости отношений ξ/ξгл для тех же труб соответственно.

ВЫВОДЫ

Разработан новый метод интенсификации тепломассообмена путем спиральной закрутки потока витыми твэлами и трубами и сформировано новое направление научных исследований: тепломассообмен в условиях искусственной турбулизации потока путем его закрутки. Установлены механизмы искусственной турбулизации потока при его закрутке и интенсификации процессов тепломассопереноса в пучках витых твэлов и труб и пути управления этими процессами путем выбора геометрических и режимных параметров. Моделирование процессов тепломассообмена в ТВС с витыми твэлами ядерного ракетного двигателя подтвердило надежность разработанных методов теплогидравлического расчета и позволило использовать результаты этих исследований при проектировании и создании космических ядерных энергодвигательных установок и теплообменных аппаратов различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзюбенко Б.В. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, Л.П. Холпанов. – М.:ФГПУ «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008.- 532с.
2. Дзюбенко Б.В. Турбулентное течение и теплообмен в каналах энергетических установок / Б.В. Дзюбенко, А.В. Сакалаускас, А.В. Ашмантас, М.Д. Сегаль. – Вильнюс: Pradai, 1995. – 300с.
3. Dzyubenko B.V., Modeling and Design of Twisted Tube Heat Exchangers / B.V Dzyubenko., L.-V. Ashmantas, M.D. Segal - New York: Begell House Inc., 2000. - 200 p.
4. Дзюбенко Б.В. Закономерности и расчет нестационарных турбулентных течений и тепломассообмена в каналах энергетических установок / Б.В. Дзюбенко, В.М. Краев, А.С. Мякочин. – М.:МАИ – Принт, 2008. – 382