

## **АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛОФИЗИКИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

**Конюхов В.Г.<sup>1</sup>, Конюхов Г.В.<sup>2</sup>, Коротеев А.А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Российский государственный университет физической культуры, Москва, Россия,*

<sup>2</sup>*ФГУП «Центр Келдыша», Москва, Россия,*

<sup>3</sup>*Московский авиационный институт (государственный  
технический университет), Москва, Россия*

В настоящее время основным источником энергии на борту космических аппаратов (КА) являются солнечные батареи на основе фотоэлектрических преобразователей. Достигнутая максимальная электрическая мощность – десятки кВт. При полном развертывании Международной космической станции (МКС) электрическая мощность должна составить ~ 100 кВт.

Усложнение задач, решаемых в околоземном пространстве, ближнем и дальнем космосе, повышение требований к энерговооруженности (сотни кВт – десятки МВт), ресурсу (5 – 10 лет) делают необходимым использование на борту ядерных энергодвигательных установок (ЯЭДУ). Ускоренное выполнение задачи возможно только при использовании ЯЭДУ, в которой реализуется режим ядерного ракетного двигателя (ЯРД) [1].

Такой установкой является ЯЭДУ с машинным преобразованием энергии, обеспечивающей выполнение следующих основных режимов:

1. Режим теплового ядерного ракетного двигателя с температурой нагрева водорода в активной зоне реактора порядка 3000 К и удельной тягой около 900 с.
2. Энергетический режим с выработкой электрической энергии в замкнутом контуре.
3. Двигательно-энергетический режим – обеспечение электрической энергией, вырабатываемой генератором замкнутого контура, одновременно бортовых систем космического аппарата, целевой аппаратуры и электрических движителей.

Реализация второго и третьего режимов возможна с использованием энергетических установок других видов – солнечных с фотоэлектрическим или машинным преобразованием энергии и ядерных с термоэмиссионным или термоэлектрическим преобразованием. Первый режим, использование которого обеспечивает ускоренные межорбитальные перелеты, полеты к другим планетам и в дальний космос, может быть реализован только с использованием ЯЭДУ с машинным преобразованием энергии.

Параметры и массогабаритные характеристики ядерной энергодвигательной установки в основном определяются характеристиками тепловых аппаратов, входящих в ее состав (реактор, рекуператор, холодильник, холодильник-излучатель). Для этих аппаратов

далее приводится анализ решений, которые позволяют минимизировать массогабаритные характеристики и обеспечить эффективное выполнение целевых задач.

Одной из основных научно-технических проблем при создании реактора ЯЭДУ является обеспечение максимально возможной температуры газа на выходе из реактора при минимальных температурных неравномерностях в теплоносителе и материалах активной зоны с учетом различных возмущений, неравномерностей тепловыделения, особенностей течения теплоносителя и ограничений допустимых температур и их градиентов. Поскольку на режиме ЯРД активная зона реактора находится в условиях высоких температур (около 3000 К) и значительных тепловых потоков при объемном энерговыделении примерно 30 кВт/см<sup>3</sup>, даже небольшие отклонения от расчетных значений геометрических и технологических параметров (диаметры каналов, толщины стенок, концентрация делящегося вещества и т.п.), а также мощности реактора в процессе регулирования могут приводить к образованию областей местного перегрева и разрушению элементов активной зоны. Для проточной части системы охлаждения активной зоны реактора, выполненной по схеме параллельных изолированных каналов, возникновение зон местного перегрева может быть связано как с увеличением тепловыделения, так и с возможным перераспределением расхода рабочего тела между каналами в соответствии с разными гидравлическими сопротивлениями и тепловыми нагрузками.

Достоверное прогнозирование места и уровня максимального возмущения температуры или определение их в экспериментах в реальной конструкции является затруднительно. Поэтому представляется целесообразным определять возможное возмущение температуры от совместного действия предельных случайных отклонений основных параметров в области максимальных значений регулярных неравномерностей. Если при этом выполняется условие не превышения температурой допустимых значений по всему объему активной зоны, а возможные отклонения не выходят за пределы поля допуска, ограниченное предельными значениями, то обеспечивается надежное охлаждение конструкции. Таким образом предполагается, что отклонения не независимы.

С учетом изложенных соображений группа соседних каналов с неблагоприятным сочетанием отклонений может рассматриваться как потенциально опасная, вероятность существования которой значительна потому, что уменьшению диаметра канала обычно сопутствует утолщение тепловыделяющей стенки и даже при расчетной концентрации урана и, соответственно, в этой области каналов увеличивается выделение тепла. В результате затрудняется отвод тепла теплопроводностью от внутренних каналов рассматриваемой группы, а также уменьшается расход газа через каналы уменьшенного диаметра.

Представим возмущение температуры стенки  $\delta T_w$  на выходе из канала с измененными по сравнению с расчетными параметрами форме

$$\delta T_w = \Delta T (\Delta \bar{T} - 1) + \theta (\bar{\theta} - 1), \quad (1)$$

где  $\Delta \bar{T} = \Delta T' / \Delta T$ ;  $\bar{\theta} = \theta' / \theta$  – относительные подогрев и температурный напор в канале с измененными по сравнению с расчетными параметрами соответственно.

Изменение температуры стенки  $\delta T_w$  определяется изменениями  $\Delta \bar{T}$  и  $\bar{\theta}$  в зависимости от отклонения параметров от номинальных значений. Необходимые соотношения могут быть получены из совместного рассмотрения уравнений, описывающих течение жидкости в канале с подводом (отводом) тепла [2]. Для режимов ядерного ракетного двигателя  $\Delta T \gg \theta$ ,  $\Delta \bar{T} > \bar{\theta}$ , поэтому в реальной конструкции реактора (с учетом возможных отклонений и неравномерностей) получение необходимых среднemasсовых температур рабочего тела с помощью обычных способов улучшения условий теплообмена (увеличение коэффициента теплоотдачи) не представляется возможным. Из выражения (1) следует, что в активной зоне, выполненной по схеме параллельных изолированных каналов, возможно накопление неравномерности температуры по длине канала. Чем короче канал с неблагоприятным сочетанием отклонений, тем меньше температуры в нем отличаются от расчетных. В этой связи целесообразным является создание конструкции тепловыделяющей сборки (ТВС) из ряда блоков по длине, между которыми предусмотрены специальные устройства смешения (коллекторы смешения), в которых должно происходить выравнивание температурных неравномерностей по сечению. Из (1) также следует, что одинаковые относительные отклонения параметров от расчетных значений приводят к большим отклонениям температуры там, где значительны подогревы рабочего тела и температурные напоры. Поэтому, целесообразным является смещение зоны высоких тепловых потоков в область пониженных температур рабочего тела. Последнее достигается продольным профилированием тепловыделения.

Наконец, накапливающаяся неравномерность температуры, характерная для канальных элементов, может быть уменьшена переходом к конструкциям ТВС с единым проходным сечением для газа: шариковые схемы, схемы на основе витых стержней и т.п.

Влияние регулярных радиальных и азимутальных неравномерностей тепловыделения в реакторе на неравномерности температур может быть уменьшено радиальными физическим и гидравлическим профилированием реактора.

Предложенные решения реализованы при создании тепловыделяющей сборки ЯРД для испытания в реакторе ИГР [3] и прототипа ЯРД – реактора ИРГИТ [4], успешно прошедших натурные испытания. Введение четырех коллекторов по длине ТВС, предназна-

ченной для испытания в реакторе ИГР, позволило увеличить среднемассовую температуру рабочего тела на выходе из сборки с 1600 К до 2300 К в условиях возможного возникновения отклонений в номинальных параметрах сборки при заданной максимально допустимой температуре для конструкционных материалов [5]. Дополнительное продольное профилирование тепловыделения в сборке обеспечило надежный нагрев до температуры  $\sim 2700$  К. На рис. 1 представлено изменение безразмерной температуры газа по радиусу в выходном сечении для ТВС реактора ИРГИТ при различных значениях безразмерного эффективного коэффициента переноса тепла  $\bar{D}_3 = D_3 / (vd)$  в системах витых стержней – структурах с единым проходным сечением для рабочего тела ( $D_3$  – эффективный коэффициент переноса тепла,  $v$  – скорость рабочего тела,  $d$  – характерный геометрический размер). Так, при значении среднемассовой температуры газа  $T_k = 3000$  К для  $\bar{D}_3 = 0,005$  максимальная температура в сечении может составлять  $\sim 3500$  К. Поле температур существенно зависит от величины  $\bar{D}_3$  и может регулироваться формой элементов тепловыделяющей сборки, в значительной степени определяющей величину этого комплекса. Правильный выбор формы ТВЭЛОВ и введение радиального профилирования тепловыделения в сборке может обеспечить достижение температурной неравномерности в 100 – 150 градусов.

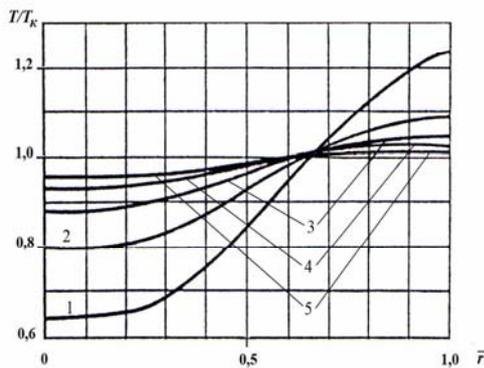


Рис. 1. Изменение безразмерной температуры газа по радиусу в выходном сечении ТВС. ( $\bar{D}_3 = 0,005$  – кривая 1;  $\bar{D}_3 = 0,02$  – кривая 2;  $\bar{D}_3 = 0,035$  – кривая 3;  $\bar{D}_3 = 0,05$  – кривая 4;  $\bar{D}_3 = 0,065$  – кривая 5).

Для ТВС на основе витых стержней экспериментально установлено [6], что возможны существенные неравномерности распределения скоростей газа в поперечном сечении.

Этот результат представляется естественным в том смысле, что гидравлические свойства в объеме сборки могут быть неоднородными (источники неравномерностей – несколько различные геометрические параметры и форма поперечного сечения стержня, кривизна оси стержня; особенности обтекания групп соседних стержней с различным вза-

имным расположением лепестков и т.п.) и для большого числа стержней подчиняется нормальному закону распределения случайных величин (рис. 2).

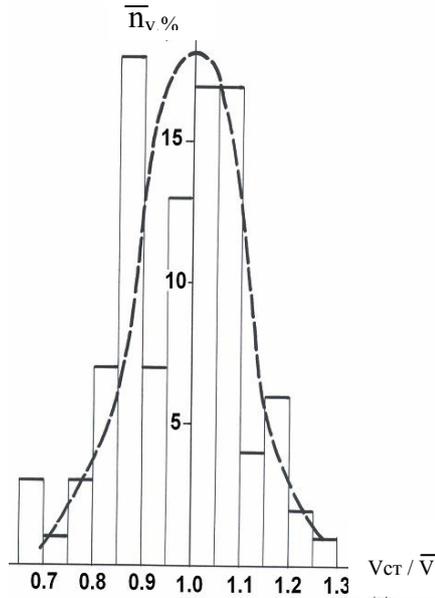


Рис.2. Распределение скоростей в выходном сечении сборки ( $\bar{p}_v = p_v/N$ ,  $N$  – общее число стержней в сборке,  $\bar{p}_v$  – число стержней, для которых скорости обтекания одинаковы,  $V_{ст}$  – скорость обтекания единичного стержня,  $\bar{V}$  – средняя скорость газа для сборки стержней)

Неравномерности по скорости в случае возможного нарушения целостности группы соседних стержней при эксплуатации реактора могут приводить к образованию неравномерности по скорости в масштабе группы [6].

Эти особенности могут приводить к возникновению зон с разными условиями обтекания и теплообмена в сборке стержней. Неравномерности скорости формируются на длине стержня (разрывы в распределении скорости мало вероятны). Тогда по профилю скорости в выходном сечении возможно определить среднее значение коэффициента гидравлического сопротивления для некоторой условной «линии тока» (вдоль одного стержня). С помощью такого типа коэффициентов сопротивления возможно предсказать распределение скоростей рабочего тела и поле температур в поперечном сечении сборки и при некоторых вероятных дефектах ТВС.

Средний коэффициент гидравлического сопротивления сборки стержней  $\xi$  не вполне характеризует состояние проточной части. Как показывают результаты экспериментов, при значительных дефектах в сборке величина  $\xi$  изменяется незначительно, а поле скоростей – существенно [6].

Для обследованныхборок равномерность поля скоростей может быть улучшена ужесточением допусков на геометрические параметры стержней.

Перспективной представляется ТВС на основе коаксиальных цилиндров со спиральным оребрением. Наибольший интерес представляет сборка, в которой цилиндры имеют двухстороннее оребрение с противоположным направлением закрутки ребер. При такой конструктивной схеме азимутальные неравномерности тепловыделения выравниваются в спиральном движении теплоносителя, радиальные – физическим и гидравличе-

ским профилированием (для цилиндров - разная концентрация урана, разные закрутки ребер и гидравлические диаметры каналов), мелкомасштабные – при перекрестном течении теплоносителя. Опытные сборки были изготовлены из графита и карбидов тугоплавких металлов и прошли термочностные испытания. По технологии изготовления и термочностным свойствам таких систем получены обнадеживающие результаты [7].

В состав замкнутого контура ЯЭДУ входят рекуператор и холодильник. К требованиям минимума массогабаритных характеристик этих устройств добавляется требование высокого гидродинамического совершенства проточных трактов. Оно следует из необходимости получения максимального коэффициента полезного действия цикла, реализуемого в замкнутом контуре. С увеличением к.п.д. ЯЭДУ снижаются количество отводимого от установки низкопотенциального тепла, площадь поверхностей теплообмена и массогабаритные характеристики холодильника-излучателя.

Для каждой конкретной задачи при определении конструктивной схемы теплообменных аппаратов возникает проблема выбора оптимальной формы теплопередающих поверхностей. Под оптимальной понимается такая форма поверхности, которой при прочих равных условиях соответствует минимум теплопередающей площади. Ее уменьшение достигается использованием методов интенсификации конвективного теплообмена, приводящим к увеличению затрат энергии на прокачку теплоносителя. Из-за сложности происходящих физических процессов построение общей теории, позволяющей прогнозировать количественные характеристики возможных способов интенсификации, является затруднительным. В этой связи представления о предполагаемом механизме интенсификации подтверждаются экспериментальными данными.

В теплогидравлических расчетах теплообменных устройств используются коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления, определяемые экспериментально и входящие в уравнения баланса тепла и количества движения. Для участка поверхности конечной длины при умеренных скоростях течения газообразного теплоносителя (число Маха не превышает 0,3) из совместного рассмотрения этих уравнений [8] можно получить выражение для отношения площади теплообменной поверхности  $F$  к мощности теплообменника  $Q$  :

$$\frac{F}{Q} = \frac{1}{2c_p} \left( \frac{\Delta T}{2\Delta p \rho \theta^3} \right)^{1/2} \left( \frac{\xi}{St^3} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta p$  – плотность, теплоемкость, изменение температуры, перепад давлений теплоносителя соответственно,  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления,  $St$  – критерий Стантона.

Из (2) следует, что минимум площади поверхности при прочих равных условиях (при заданных  $Q$ ,  $c_p$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta p$ ,  $\rho$ ,  $\theta$ ) соответствует минимуму значения  $Ko = (\xi/St^3)^{1/2}$ , являющегося критерием теплогидравлической эффективности поверхности при конвективном теплообмене. На рис.3 представлены зависимости  $Ko$  от числа Рейнольдса  $Re$  для различных видов поверхностей теплообмена. Зависимости построены по экспериментальным данным, полученным в опытах с использованием в качестве теплоносителя воздуха (число Прандтля  $Pr=0,7$ ) [8, 9 и др.]. Для всех рассмотренных поверхностей с ростом числа  $Re$  значение критерия  $Ko$  увеличивается, минимальное значение соответствует минимально реализованному числу  $Re$ . Для систем, характеризующихся особенностями изменения гидравлических и тепловых характеристик ( $\xi$ ,  $St$ ) при переходе к турбулентному режиму течения отмечаются максимумы значения  $Ko$  (круглая труба, плоский канал, плоский периодически пережатый канал (соответственно кривые 1-3), пластинчато-ребристая поверхность с гладкими ребрами и т. п.

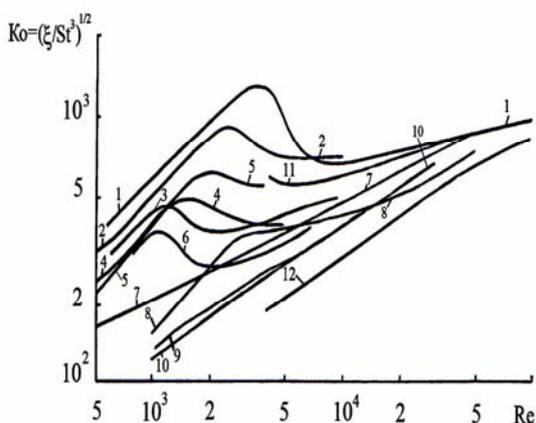


Рис. 3. Изменение комплекса  $Ko = (\xi/St^3)^{1/2}$  в зависимости от числа Рейнольдса (1 – круглая труба; 2 – плоский канал; 3 – плоский периодически пережатый канал; 4 – шахматный пучок плоских пережатых труб; 5 – шахматный пучок плоских труб; 6 – коридорный пучок гладких труб; 7 – беспорядочно расположенные шары при пористости 0,4; 8 – трубы с кольцевыми вставками; 9, 10 – пакеты решеток с шахматным и коридорным расположением соседних решеток при пористости 0,5; 11 – пластинчато-ребристая поверхность с гладкими ребрами; 12 – пакет решеток с коридорным расположением соседних решеток при пористости 0,83).

График зависимости экспериментальных данных по  $(\xi/St^3)^{1/2}$  от числа  $Re$  для шаровой насадочной поверхности (зависимость 7) с беспорядочным расположением шаров [9] делит представленную на рис. 3 область изменения на две части: выше отмеченной зависимости располагаются данные по характеристикам продольно обтекаемых поверхностей (труба, пережатый канал, пластинчато-ребристая поверхность с гладкими ребрами и т. д.), ниже – характеристики поверхностей, использующих принцип поперечного обтекания

Выполненные исследования показывают, что в условиях турбулентного течения при  $Re > 10^4$  механизм переноса не сильно зависит от формы вносимых в поток возмущений. Несколько лучшие соотношения между характеристиками теплообмена и гидравлическо-

го сопротивления соответствуют поверхностям с поперечным обтеканием. Для всех рассмотренных поверхностей теплообмена при прочих равных условиях минимум отношения площади поверхности теплообменника к снимаемой тепловой мощности соответствует минимально реализованному числу Рейнольдса.

Для получения приемлемых коэффициентов полезного действия при преобразовании тепловой энергии в электрическую в энергетических установках с замкнутым контуром необходим отвод тепла во вне из низкотемпературной части цикла. В условиях космоса это тепло, а также другие излишки тепла, связанные с обеспечением надежного функционирования систем космических аппаратов, можно сбрасывать без потери рабочего тела только излучением. К настоящему времени созданы конструкции холодильников-излучателей, успешно работающих в составе космических систем, из которых наиболее отработаны трубчато-ребристые конструкции.

Использование традиционных трубчато-ребристых плоских панелей с двусторонним излучением позволяет уменьшить размеры панелей приблизительно вдвое по сравнению с вариантом одностороннего плоского или цилиндрического излучателя. Излучатель, состоящий из двух плоских панелей, пересекающихся под прямым углом, имеет из-за взаимного облучения панелей большую площадь поверхности излучения, чем плоский той же мощности, но в целом более компактен.

Важным требованием к излучателям является долговременная надежность в условиях метеоритной опасности. Наиболее простой способ его удовлетворения заключается в бронировании уязвимых поверхностей, пробой которых приводит к разгерметизации контура теплоносителя. Вследствие бронирования масса трубчато-ребристых излучателей с газовым теплоносителем может увеличиваться более, чем в 1,3 раза.

С увеличением мощности космической энергетической установки масса излучателя составляет все более заметную долю в общей массе, а его габариты существенно влияют на габариты солнечной установки и определяют габариты ядерной. Для минимизации массы и габаритов излучателя целесообразно максимально приблизить температуру излучающей поверхности к температуре охлаждаемого рабочего тела за счет отказа от промежуточного теплообменника и уменьшения теплового сопротивления между излучающей поверхностью и теплоносителем. Такая схема может быть реализована в капельных холодильниках-излучателях [10 и др.], в которых отвод тепла от специальным образом сформированного капельного потока теплоносителя происходит излучением непосредственно в космическое пространство при движении капельной пелены от генератора капель к приемнику.

Разработанные на сегодня методы расчета подобных систем и выполненный расчетный анализ [11, 12] позволяют сделать вывод о том, что в широком диапазоне рабочих температур (от 300 К до 1000 К) капельные холодильники-излучатели по удельным массовым характеристикам в 5 и более раз превосходят теплообменники, выполненные по стандартным технологиям за счет лучшего развития поверхности теплообмена и отсутствия необходимости бронирования. Последнее имеет большое значение, поскольку означает, что космический корабль, должен нести существенно меньшую массу теплообменника, т.е. масса полезной нагрузки может возрасть в несколько раз.

Для создания потока монодисперсных капель рабочего тела используется метод вынужденного капиллярного распада. Применительно к заборнику капель приняты две схемы, применение которых может обеспечить требуемое давление рабочего тела на входе в перекачивающее устройство. Активный заборник предполагает создание нужного эффекта за счет центробежных сил – капли падают на вращающийся диск специальной формы, с периферии которого попадают в насос. В пассивном заборнике капли падают на движущуюся по внутренней поверхности заборника пленку той же жидкости, инициирующую перемещение собранного потока к насосу.

Комплекс экспериментальных и расчетных работ позволил разработать конструкции генератора монодисперсных капель и заборника капель для модели капельного излучателя, исследование которой на орбитальной станции «Мир» [13] подтвердило правильность принятых решений. Оптимизированные в наземных условиях материал, качество обработки, угол наклона поверхности заборника, форма канала и условия истечения из формообразующего пленку канала обеспечивают в условиях микрогравитации устойчивое течение пленки и сбор падающих на нее капель без нарушения сплошности ее потока. Устойчивое функционирование генератора потока монодисперсных капель с однорядной фильерой (семь каналов с центрами отверстий, лежащих на одной прямой) подтверждает правильность выбора параметров каплеобразования. Особенности работы генератора капель с многорядной фильерой показали, что следует продолжить оптимизацию условий запуска и начальной скорости истечения струй из фильеры.

**Вывод.** В результате выполненного анализа закономерностей рабочего процесса в основных тепловых аппаратах, входящих в состав ядерной энергодвигательной установки (ядерный реактор, теплообменники, холодильник-излучатель), сформулированы предложения по оптимизации их конструктивных схем из условия минимизации массогабаритных характеристик и реализации параметров, обеспечивающих эффективность применения ЯЭДУ.

**Список использованных источников**

1. Акимов В.Н., Конюхов В.Г., Коротеев А.А. Эффективность применения космических многорежимных ядерных энергодвигательных установок с машинным преобразованием энергии // Известия РАН, Энергетика, 2007, № 3.
2. Конюхов Г.В. Особенности теплофизики транспортной ядерной энергетической установки // Известия АН СССР, Энергетика и транспорт. 1991. № 5. С.102-108.
3. Курчатov И.В., Доллежалъ Н.А. и др. Импульсный графитовый реактор ИГР // «Атомная энергия». 1964. Т. 17. Вып. 6. С. 463-473.
4. Конюхов Г.В., Рачук В.С., Федик И.И. и др. Прототип ядерного ракетного двигателя – реактор ИРГИТ // Атомная энергия. 2004. Т.97. Вып. 3.
5. Демянко Ю.Г., Конюхов Г.В., Коротеев А.С. и др. Ядерные ракетные двигатели. М.: «Норма – Информ», 2001.
6. Дьяков Е.К., Конюхов В.Г., Конюхов Г.В. Экспериментальное исследование влияния возмущений в геометрии элементов регулярно-пористой системы на гидродинамические характеристики тепловыделяющей сборки ядерного реактора. Инженерно-физический журнал, ( в печати).
7. Кац С.Н., Конюхов Г.В. и др. Разработка нагревных секций блочного типа. Препринт НИИ-1, 1972.
8. Конюхов Г.В., Петров А.И. К определению эффективности теплообменных поверхностей в условиях конвективного теплообмена // Известия АН СССР, Энергетика и транспорт. 1990. № 3. С. 168-171.
9. Кейс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. М.: Энергия, 1967. 221 с.
10. Mattic A.T., Hertzberg A. Liquid droplet radiator technologies.-Space nuclear power systems, 1984. Proc. 1-st symposium on space nuclear power systems, 1984, vol. 2.
11. Конюхов Г.В., Коротеев А.А., Новомлинский В.В. и др. Моделирование процессов радиационного теплообмена и массопереноса в теплообменных устройствах космического назначения на основе капельных потоков // Инженерно-физический журнал. 1998. Т. 71. № 1.
12. Конюхов Г. В., Баушев Б. Н., Коротеев А.А. и др. Капельный холодильник-излучатель для космических энергетических установок // IV Минский Международный форум по тепломассообмену. Минск, 2000. Т. 10.
13. Konioukhov G.V., Koroteev A.A. Study of Generation and Collection of Monodisperse Droplets Flows in Microgravity and Vacuum.- Journal of Aerospace Engineering, April 2007, v. 20, №2.