

2. Забродский, С. С. Теплообмен пульсирующего слоя влажного тетрациклина с поверхностью нагрева / С. С. Забродский, И. А. Бокун // Исследование тепло- и массообмена в технологических процессах и аппаратах. – Минск: Наука и техника, 1966. – С. 135–140.
3. Бокун, И. А. Теплообмен между пульсирующим слоем и пучком погруженных в него труб / И. А. Бокун // Известия АН БССР. Серия физико-энергетических наук. – 1977. – № 2. – С. 37–40.
4. Форхгеймер, Ф. Гидравлика / Ф. Форхгеймер. – М.: Л., 1935. – 615 с.
5. Torre, C. Die Theorie des Flussbettes / C. Torre // Östern Ing. Z. – 1964. – Vol. 7, No 5.
6. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М.; Л.: ГИТТЛ, 1951. – 824 с.
7. Боровский, В. Р. Исследование гидродинамики фонтанирующего слоя полимерного материала / В. Р. Боровский, Л. М. Мишнаевский, Н. А. Шаркова // Теплофизика и теплотехника. – Киев: Наук. думка, 1971. – Вып. 19. – С. 80–83.
8. Соу, С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. – М.: Мир, 1971. – 530 с.
9. Уоллис, Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
10. Дэвидсон, И. Ф. Псевдооживление твердых частиц / И. Ф. Дэвидсон, Д. Харрисон. – М.: Химия, 1965. – 184 с.

REFERENCES

1. Fedorov, A. V., Fedorchenko, I. A., Vasilishin, M. S., Karpov, A. G., & Ivanov, O. S. (2012) Calculation of Bed Extension of Particulates During its Impulse Pseudo-Fluidization. *Prikladnaia Mekhanika i Tekhnicheskaiia Fizika* [Applied Mechanics and Engineering Physics], 53 (3), 105–116 (in Russian).
2. Zabrodskiy, S. S., & Bokun, I. A. (1966) Heat Exchange of Pulsed Bed of Moisty Tetracyclin with the Surface of Heating. *Investigation of Heat-Mass Exchange in Technological Processes and Apparatuses*. Minsk, Nauka i Tehnika. 135–140 (in Russian).
3. Bokun, I. A. (1977) Heat Exchange Between Pulse Bed and Series of Tubes in It. *Izvestiia AN BSSR. Seriiia Fiziko-Energeticheskikh Nauk* [News of Academy of Science of BSSR. Series of Physical Sciences and Energy], 2, 37–40 (in Russian).
4. Forghheimer, F. (1935) *Hydraulics*. Moscow; Leningrad. 615 p. (in Russian).
5. Torre, C. (1964) Die Theorie des Flussbettes. *Östern Ing. Z.*, 7 (5) (German).
6. Abramovich, G. N. (1951) *Applied Gas Dynamics*. Moscow; Leningrad: State Publication of Technical and Theoretical Literature. 824 p. (in Russian).
7. Borovskiy, V. R., Mishnaevsky, L. M., & Sharkova, N. A. (1971) Investigation of Hydro-dynamics of Spotting Bed of Polymeric Material. *Teplofizika i Teplotekhnika* [Heat Physics and Heat Engineering]. Kiev, Nauk. Dumka, 19, 80–83 (in Russian).
8. Sou, S. (1971) *Hydro-Dynamicsulti-Phase Systems*. Moscow, Mir. 530 p. (in Russian).
9. Wallis, G. (1972) *One-Dimensional Two-Phase Flow*. Moscow, Mir. 440 p. (in Russian).
10. Davidson, I. F., & Harrison, D. (1965) *Pseudo-Fluidization of Solid Particles*. Moscow, Chemistry. 184 p. (in Russian).

Представлена кафедрой экономики
и организации энергетики

Поступила 07.04.2014

УДК 621.039.542:[532.546.6+532.5.031]

НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРОВОДЯНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ЗАСЫПКЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЧАСТИЦ

Канд. техн. наук, доц. СОРОКИН В. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: sorokin.npp@gmail.com

Существенное повышение безопасности атомной энергетики может быть достигнуто за счет внедрения микротвэльного топлива в реакторных уста-

новках с водяным теплоносителем. Микротвэл представляет собой шарик диаметром порядка миллиметра, состоящий из топливного ядра, покрытого защитной оболочкой. Оболочки разделяют топливо и теплоноситель и обеспечивают удержание продуктов деления ядер. Благоприятные теплофизические свойства засыпки микротвэлов в сочетании с водяным теплоносителем позволяют избежать аварийных последствий перегрева топлива. Известны предложения по использованию микротвэлов в ВВЭР, прямоточном реакторе с перегревом пара, реакторе со спектральным регулированием за счет изменения паросодержания.

В статье расчетным методом анализируется возможность возникновения режимов с неравномерностью распределения теплоносителя в засыпке. Установлена неустойчивость, связанная с неоднозначностью зависимости перепада давлений от расходного паросодержания. Неустойчивость уменьшается с увеличением массового расхода, размера частиц, со снижением абсолютного давления, а влияние пористости на эффект мало. Наиболее опасный диапазон – при паросодержании порядка единицы. Возникают поры, заполненные только паром, и поры с водопаровой фазой при паросодержании, меньшем среднего по засыпке. В прямоточном реакторе с перегревом пара в таком режиме на выходе теплоноситель будет содержать долю влаги в капельной форме. Найдено, что в части режимов с недогревом на входе движение теплоносителя неустойчиво против сильного возмущения течения. В реакторе радиального типа при прочих равных условиях неравномерность распределения двухфазного теплоносителя по засыпке выше по сравнению с однофазным теплоносителем.

Ключевые слова: пароводяной теплоноситель, засыпка, тепловыделяющие частицы, ядерный реактор.

Ил. 3. Библиогр.: 11 назв.

NONUNIFORMITIES OF TWO-PHASE COOLANT DISTRIBUTION IN A HEAT GENERATING PARTICLES BED

SOROKIN V. V.

Belorussian National Technical University

Sufficient atomic power generation safety increase may be done with micro-fuel adapting to reactor plants with water coolant. Microfuel particle is a millimeter size grain containing fission material core in a protecting coverage. The coverage protects fuel contact with coolant and provides isolation of fission products inside. Well thermophysical properties of microfuel bed in a direct contact with water coolant excludes fuel overheating when accidents. Microfuel use was suggested for a VVER, a direct flow reactor for superheat steam generation, a reactor with neutron spectra adjustment by the steam partial content varying in the coolant.

Nonuniformities of two-phase coolant distribution in a heat generating particles bed are predicted by calculations in this text. The one is due to multiple-valuedness of pressure drop across the bed on the steam quality dependency. The nonuniformity decreases with flow rate and particle size growths absolute pressure diminishing while porosity effect is weak. The worse case is for pressure quality of order of one. Some pure steam filled pores appears parallel to steam water mixture filled pores, latter steam quality is less than the mean of the bed. Considering this regime for the direct flow reactor for superheat steam generation we predict some water drops at the exit flow. The two-phase coolant filtration with subcooled water feed is unstable to strong disturbance effects are found. Uniformity of two-phase coolant distribution is worse than for one-phase in the same radial type reactor.

Keywords: steam-water coolant, fillings, heat-emitting particles, nuclear reactor.

Fig. 3. Ref.: 11 titles.

Задача расчета возможной неравномерности распределения пароводяного теплоносителя в засыпке тепловыделяющих частиц возникает в связи с созданием насыпных активных зон ядерных реакторов с микротвэльным топливом. Такая техника разрабатывается с целью кардинального улучшения безопасности атомной энергетики.

Совокупность требований к ядерному топливу, теплоносителю и другим материалам активной зоны настолько ограничена, что на сегодняшний день системе «вода – цирконий – оксид урана (плутония)» в активной зоне мощной коммерческой атомной электростанции трудно предложить альтернативу. К сожалению, эта система уязвима при авариях с нарушением отвода теплоты от топлива. Уже при 900 °С прочность циркониевого сплава снижается, заметно увеличивается выход водорода вследствие реакции циркония с водой, прогрессирует течь радиоактивных веществ. Рабочая температура в центре некоторых таблеток топлива превышает 2000 °С, так что угроза реализации опасного перегрева оболочки не умозрительна. Причин, которые могут привести к нарушению отвода теплоты от топлива, много: течи теплоносителя, отключение электроэнергии, кризис теплоотдачи. Ситуация усугубляется невозможностью мгновенного прекращения генерации теплоты в активной зоне, в течение времени порядка минуты мощность можно снизить на порядок, остаточная тепловая энергия на уровне 40 МВт выделяется месяцами. Сценарии инцидентов с возможным нарушением отвода теплоты от топлива учитываются уже на стадии проекта современного энергоблока, для каждого инцидента предусматриваются меры и средства, гарантирующие непопадание радиоактивности в окружающую среду. Тем не менее возможность нарушения отвода теплоты от топлива объективна и вызывает обоснованные опасения специалистов и общественности в достаточности уровня безопасности атомной электростанции, что является постоянным аргументом против выбора вариантов с ядерной компонентой энергетики.

Существенно повысить надежность при нарушении отвода теплоты от топлива можно при использовании топлива в форме микротвэлов, непосредственно охлаждаемых водяным теплоносителем. Микротвэл представляет собой шарик, состоящий из топливного ядра, покрытого защитной оболочкой. Оболочки разделяют топливо и теплоноситель и обеспечивают удержание продуктов деления ядер. Микротвэлы, свободно насыпанные в корзины, образуют засыпки, которые являются структурными элементами ТВС. Теплоноситель входит сквозь стенку корзинки, движется сквозь поры между микротвэлами, нагревается и выходит через противоположную стенку корзинки. Температура топлива в микротвэле низкая, в центре зерна – порядка 350 °С. Это обеспечивает высокий уровень самозащищенности, даже небольшое повышение температуры топлива выключает цепную реакцию без использования стержней управления и защиты. Тепловые переходные процессы в засыпках микротвэлов протекают быстро. Оболочки микротвэлов не имеют швов, прочные и стойкие они надежно удерживают продукты деления, не содержат металлического циркония, могут работать при больших степенях выгорания топлива до 10–15 % тяжелых ядер, выдерживают нагрев до 1600 °С. Засыпка характеризуется большой площадью поверхности теплообмена и низкой мощностью теплового потока. Благоприятные теплофизические свойства системы микротвэлов и водяного теплоносителя позволяют избежать аварийных последствий перегрева топлива.

Известны предложения по использованию микротвэлов в ВВЭР [1], прямоточном реакторе с перегревом пара [2], реакторе со спектральным регулированием за счет изменения паросодержания [3] и в других [4–6]. Двухфазные течения в энергетическом оборудовании могут быть неустойчивыми [7], в частности известны примеры неустойчивых течений через пористые среды и зернистые засыпки [8]. Эффект может проявляться как автоколебание и/или расслоение теплоносителя по паросодержанию. С появлением уравнений движения, адаптированных для приложения к течениям двухфазной жидкости в засыпке микротвэлов при параметрах, характерных для атомной энергетики [9], возникла возможность расчетного определения неравномерностей распределения и неустойчивых режимов движения теплоносителя. Такая информация позволяет избежать нежелательного режима или предусмотреть меры для ослабления его проявления. Рассмотрим некоторые типы неустойчивости.

Для устойчивости состояния равномерного распределения пара по параллельным поровым каналам увеличение перепада давления Δp в зависимости от массового расходного паросодержания x должно происходить быстрее, чем по линейному закону (вторая производная перепада давления по расходному паросодержанию больше нуля). Тогда любая локальная разница расходов в соседних порах будет приводить к возрастанию местного сопротивления и появлению сил, стремящихся ее устранить. Режимы на рис. 1 получены расчетом по зависимостям, предложенным в [9], Hh – толщина засыпки. Варианты 1, 2, 4 устойчивы, режим 3 при $x \sim 1$ не устойчив. Неустойчивость уменьшается с увеличением массового расхода и размера частиц, со снижением абсолютного давления. Влияние пористости на эффект мало.

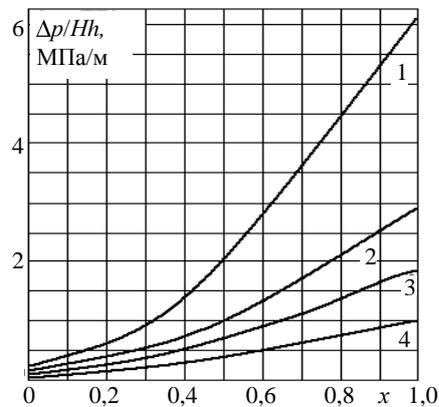


Рис. 1. Зависимость перепада давления от паросодержания: 1 – $(\rho w)_f = 55 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, абсолютное давление $p = 0,9 \text{ МПа}$; 2 – 55, 2,0; 3 – 55, 3,0; 4 – 22, 0,9; диаметр микротвэла $d = 2 \text{ мм}$; пористость $\varepsilon = 0,37$, «вода + пар», расчет по [9]

Режимы с более заметным проявлением эффекта подобраны на рис. 2. Течения, соответствующие линии 3 на рис. 1 и линиям 1, 3 на рис. 2, отличаются массовыми расходами. Снижение расхода приводит к усилению неустойчивости и возникновению многозначности в зависимости $\Delta p(x)$. По мере снижения расхода на графике возникает точка перегиба при $x = 1$, затем она сдвигается в область более низких паросодержаний, параллельно формируется максимум перепада давления при $x < 1$ ($x = 0,95\text{--}0,99$), который также продвигается в область меньших x . Кривая 1 в совокупности с

прямой 2, проведенной через точки $\Delta p(0)$ и $\Delta p(1)$ на рис. 2, ограничивают область неустойчивости (выделена заливкой).

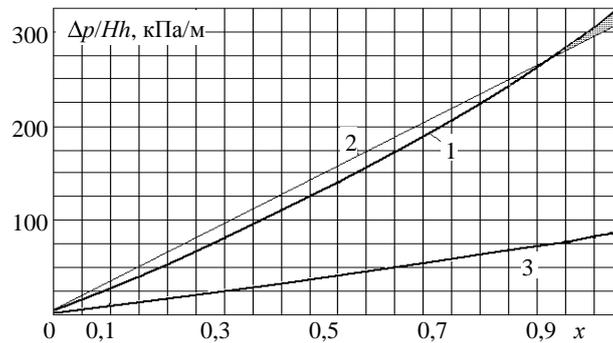


Рис. 2. Зависимость перепада давления от паросодержания:

1, 2 – $(\rho_w)_f = 22 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 3 – 11; $p = 3,0 \text{ МПа}$; $d = 2 \text{ мм}$; $\varepsilon = 0,37$, «вода + пар», расчет по [9]

Наличие максимума давления при $x \sim 1$ должно приводить к появлению пор, заполненных только паром, и пор с водопаровой фазой при паросодержании, меньшем среднего по засыпке. Следует ожидать, что в прямоточных реакторах с перегревом пара на выходе теплоноситель будет содержать долю влаги в капельной форме, если не предусмотреть меры по подавлению неустойчивости.

Оценим влияние фактора двухфазности теплоносителя на равномерность распределения потока в засыпке плоского реактора с радиальной раздачей. Схема устройства приведена на рис. 3. Теплоноситель при температуре насыщения входит через участок 1 в раздающий коллектор, поступает в насадки 7, 8, выходит в собирающий коллектор и покидает реактор через участок 6. В засыпке теплоноситель нагревается и обогащается паровой фазой. В собирающем коллекторе жидкость двухфазная, в раздающем – однофазная.

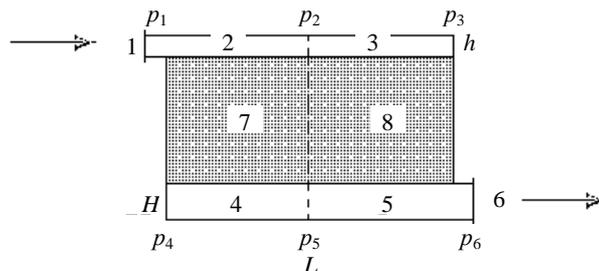


Рис. 3. Схема реактора

Примем размер раздающего коллектора h , собирающего – H , длину реактора – L . Отличие расходов по участкам 7, 8 определяет неравномерность распределения теплоносителя по засыпке. Пусть скорости по участкам отличаются незначительно: $U_7 = U_8(1 + \varepsilon\varepsilon)$, $\varepsilon\varepsilon \ll 1$.

В засыпке паросодержание растет линейно по длине, если энерговыделение равномерно по объему. По рис. 1 и 2 при $x < (0,15-0,30)$ приближенно можно принять $\Delta p(x) \sim (1 + kx)$, где k – коэффициент. Тогда перепад давления на слое засыпки представится выражением $\rho k U^2 (1 + kx/2)$,

где ρ – плотность жидкости; κ – проницаемость засыпки; U – скорость фильтрации; x_L – паросодержание на выходе из засыпки.

Динамические условия по участкам реактора (для простоты коллекторы считаем короткими и их гидравлическое сопротивление не учитываем) определяются по формулам:

$$p_1 + \rho U_1^2 = p_2 + \rho U_2^2 = p_3; \quad p_6 + \underline{\rho} U_6^2 = p_5 + \underline{\rho} U_4^2 = p_4; \quad (1)$$

$$(p_1 + p_2)/2 - (p_4 + p_5)/2 = \rho \kappa U_7^2 (1 + \kappa x_L/2); \quad (2)$$

$$(p_3 + p_2)/2 - (p_6 + p_5)/2 = \rho \kappa U_8^2 (1 + \kappa x_L/2), \quad (3)$$

где $\underline{\rho}$ – плотность двухфазной жидкости.

Условия сохранения массы:

$$hU_1^2 = LU_7; \quad HU_6 = \rho/\underline{\rho} LU_7. \quad (4)$$

Из уравнений (1)–(4) следует оценка величины неравномерности $\varepsilon\varepsilon$:

$$\varepsilon\varepsilon_{\text{дф}} = [(\rho/\underline{\rho})(L/H)^2 + (L/h)^2]/[4\kappa(1 + \kappa x_L/2)]; \quad (5)$$

$$\varepsilon\varepsilon_{\text{оф}} = [(L/H)^2 + (L/h)^2]/4\kappa; \quad (6)$$

$$\varepsilon\varepsilon_{\text{дф}}/\varepsilon\varepsilon_{\text{оф}} = [(\rho/\underline{\rho})(L/H)^2 + (L/h)^2]/[(L/H)^2 + (L/h)^2(1 + \kappa x_L/2)], \quad (7)$$

где $\varepsilon\varepsilon_{\text{дф}}$, $\varepsilon\varepsilon_{\text{оф}}$ – различие скоростей по частям засыпки в случае двух- и однофазного теплоносителей соответственно.

Согласно (6), неравномерность распределения теплоносителя по засыпке в устройстве по рис. 3 неизбежна. Причина – во влиянии скоростного напора в коллекторах. Неравномерность возрастает с длиной коллекторов (реактора) и убывает с увеличением сопротивления засыпки. Подбором параметров устройства неравномерность может быть ограничена приемлемым уровнем. Несмотря на простоту уравнений (1)–(4), выражение (6) адекватно представляет наблюдаемые на практике эффекты [7, 10, 11].

Неравномерность при наличии фазового перехода в засыпке, согласно (5), дополнительно ослабляется за счет роста сопротивления насадки и увеличивается за счет уменьшения плотности потока в собирающем коллекторе. Итоговое изменение равномерности по сравнению с однофазным случаем дает формула (7).

Выражение (7) можно упростить, приняв гомогенную модель для теплоносителя в собирающем коллекторе $\underline{\rho} = \rho\rho''/((1 - x_L)\rho'' + x_L\rho)$, равенство размеров коллекторов и пренебрегая величинами 1, $(1 - x_L)\rho''$ по сравнению с $x_L\rho$. Гомогенизации течения в коллекторе должен способствовать выброс из засыпки распределенных по длине парогазовых струек. С учетом упрощений из (7) получим

$$\varepsilon\varepsilon_{\text{дф}}/\varepsilon\varepsilon_{\text{оф}} = \rho/\rho''k. \quad (8)$$

Поскольку при небольших x_L можно записать $k = \Theta\rho/\rho''$; $\Theta \leq 1$ (рис. 1, 2), то

$$\varepsilon\varepsilon_{\text{дф}}/\varepsilon\varepsilon_{\text{оф}} = 1/\Theta \geq 1, \quad (9)$$

т. е. в том же реакторе, в рамках принятых упрощений, равномерность распределения двухфазного теплоносителя по засыпке ухудшится по сравнению с однофазным теплоносителем.

Рассмотрим пример движения теплоносителя через засыпку с возможностью развития большой неравномерности расхода пара на выходе. Внутри засыпки однородно по объему зерен выделяется тепловая энергия. От зерен она передается жидкости. На вход подается теплоноситель (жидкость) с недогревом, внутри засыпки происходит рост его температуры до насыщения, далее идет движение с увеличением паросодержания по длине до выхода.

Изучим сначала случай равномерного движения. Воспользуемся упрощенным уравнением движения двухфазной среды в засыпке. Для случая равномерного по сечению паросодержания перепад давления Δp на засыпке выразится формулой

$$\Delta p = w^2 \left(1 + k \int_{z_0}^1 x dz \right); \quad (10)$$

$$x = (x_0 + b)z/w - b; \quad z_0 = wb/(b + x_0),$$

w – расходная скорость теплоносителя; z – координата по толщине засыпки; z_0 – координата достижения теплоносителем температуры насыщения; x_0 – паросодержание на выходе из засыпки; b – паросодержание на входе в засыпку (недогрев).

Тогда, принимая сечение засыпки за 1, получим, что расход пара через нее составляет x_0 , расходная скорость теплоносителя w (далее w положим равной 1), значение перепада давления

$$\Delta p = 1 + kx_0/2(x_0 + b). \quad (11)$$

Рассмотрим случай неравномерного движения. Разделим сечение засыпки на две половины. Предположим, что через первую течет теплоноситель со скоростью, превосходящей w настолько, что насыщение достигается только на выходе из засыпки. Скорость составит величину $(x_0 + b)/b$, а перепад давления

$$\Delta p = [(x_0 + b)/b]^2. \quad (12)$$

Если через вторую половину течет теплоноситель со скоростью, меньшей w и равной $(b - x_0)/b$, то суммарный расход теплоносителя и пара по двум половинам окажется эквивалентным случаю равномерной фильтрации. Перепад давления по второй половине составит

$$\Delta p = [(b - x_0)/b]^2 (1 + 2kbx_0/(b - x_0)). \quad (13)$$

Рассматривая величину k как параметр, определим его, приравнявая перепады давлений в (12) и (13) по половинам засыпки:

$$[(x_0 + b)/b]^2 = [(b - x_0)/b]^2 (1 + 2kbx_0/(b - x_0)),$$

откуда

$$k = 2/(b - x_0). \quad (14)$$

Подставив (14) в (11), найдем величины b и x_0 , при которых перепад давления по формуле (12) больше перепада, вычисленного по (11)

$$1 + x_0^2/(b - x_0)(x_0 + b) > [(x_0 + b)/b]^2. \quad (15)$$

Неравенство справедливо при $\beta = x_0/b \in [0,84, 1]$. Для этих режимов смена равномерной фильтрации на сильно неравномерную будет сопровождаться снижением сопротивления засыпки. Таким образом, система в части режимов фильтрации оказывается неустойчивой против сильного возмущения.

ВЫВОД

В прямоточных реакторах с паросодержанием около единицы или с перегретым паром на выходе теплоноситель может содержать долю влаги в капельной форме, если не предусмотреть меры по нейтрализации неустойчивости равномерного паросодержания. В реакторе радиального типа выбранной конструкции равномерность распределения двухфазного теплоносителя по засыпке ухудшится по сравнению с однофазным теплоносителем. Засыпка с двухфазным теплоносителем в части режимов фильтрации с недогревом на входе неустойчива против сильного возмущения течения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективы применения микровзвлов в ВВЭР/ Н. Н. Пономарев-Степной [и др.] // Атомная энергия. – 1999. – Т. 85, вып. 6. – С. 443–449.
2. Филиппов, Г. А. Перспективы создания прямоточных микровзвльных ядерных реакторов с перегревом пара / Г. А. Филиппов, Р. Г. Боговяленский, А. А. Авдеев // Тяжелое машиностроение. – 2002. – № 1. – С. 7–11.
3. Ядерный реактор с водой под давлением с активной зоной на основе микровзвлов и способ осуществления его работы: пат. 2475869 РФ, МПК7 G21C1/00 / Е. И. Гришанин, П. Н. Алексеев; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»». – № 2012105061/07; заявл. 15.02.2012; опубл. 20.02.2013 // Бюл. № 5.
4. Исаев, А. Н. Реактор с водным теплоносителем малой мощности с топливом на базе шариковых микровзвлов / А. Н. Исаев // Атомная техника за рубежом. – 2007. – № 8. – С. 14–20.
5. Исаев, А. Н. Применение шариковых микровзвлов реакторов с газовым теплоносителем в малых водо-водяных реакторах / А. Н. Исаев // Атомная техника за рубежом. – 2007. – № 10. – С. 12–18.
6. О возможности создания безопасных водо-водяных реакторов с тепловыделяющими сборками на основе шаровых звлов / Е. Д. Домашев [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2000. – Т. 22, № 4. – С. 51–55.
7. Руководящий документ по стандартизации Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения СССР. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. Методические указания: РД 24.035.05–89. – Введ. 01.07.90. – Л.: НПО ЦКТИ, 1991. – 211 с.
8. Kaviany, M. Principles of Heat Transfer in Porous Media / M. Kaviany. – NY: Springer-Verlag, 1991. – 626 p.
9. Сорокин, В. В. Гидравлика и теплообмен шаровых засыпок в условиях активной зоны водо-водяных ядерных реакторов с микровзвлами / В. В. Сорокин. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 191 с.

10. Быстров, П. И. Гидродинамика коллекторных теплообменных аппаратов / П. И. Быстров, В. С. Михайлов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 223 с.

11. Лебедев, А. В. Влияние геометрии зернистого слоя на его гидродинамические и тепловые характеристики: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / А. В. Лебедев. – Новосибирск: ИТФ, 1988. – 156 с.

REFERENCES

1. Ponomarev-Stepnoy, N. N., Kukharkin, N. E., Khrulev, A. A., Degal'tsev, Iu. G., Glushkov, E. S., Filippov, G. A., Grishanin, E. I., & Fal'kovskii, L. N. (1999) Future Aspects of Coated Particles Fuel Application in LWR. *Atomnaia Energiia* [Nuclear Energy], 85 (6), 443–449 (in Russian).

2. Filippov, G. A., Bogoyavlensky, A. A., & Avdeev, A. A. (2002) Perspectives of Parallel-Flow Coated Particles Fuel of Nuclear Reactors Creation with Overheat of Steam. *Tiazheloe Mashinostroenie* [Heavy Engineering], 1, 7–11 (in Russian).

3. Grishanin, E. I., & Alekseev, P. N. (2013) Nuclear Reactor with Water Under Pressure with Active Zone on the Base of Coated Particles Fuel and the Manner of its Operation. Patent of the Russian Federation No 2475869 (in Russian).

4. Issaev, A. N. (2007) Reactor with Water Coolant of Small Capacity with Fuel on the Base of Spherical Coated fuel Particles. *Atomnaia Tekhnika za Rubezhom* [Nuclear Equipment Abroad], 8, 14–20 (in Russian).

5. Issaev, A. I. (2007) Application of Spherical Coated Fuel Particles of Reactors with Gas Heat Coolant in Small Two-Phase Reactors *Atomnaia Tekhnika za Rubezhom* [Nuclear Equipment Abroad], 10, 12–18 (in Russian).

6. Domashev, E. D., Domashev, V. E., Kolykhan, L. I., Fal'kovskii, L. N., & Shraiber, A. A. (2000) About Possibilities of Creation Safety Two-Phase Reactors with Heat-Emitting Adjustment on the Base of Spherical Fuel Elements. *Promyshlennaia Teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering] 22 (4), 51–55 (in Russian).

7. RD 24.035.05–89. Guiding Document on Standardization of Ministry of Heavy, Energetic and Transport Engineering SSSR. Heat and Hydraulic Calculation of Heat Exchange Equipment Nuclear Power Station. Methodology Instructions. Leningrad: Scientific-Industrial Association of Boiler-and-Turbine Institute, 1991. 211 p. (in Russian).

8. Kaviany, M. (1991) *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. NY, Springer-Verlag. 626 p.

9. Sorokin, V. V. (2010) *Hydraulics and Heat Exchange of Spherical Fillings Under Conditions of Active Zone of Water-Cooled Nuclear Reactors with Coated Fuel Particles*. Minsk: Belorussian Science. 191 p. (in Russian).

10. Bystrorov, P. I., & Mikhailov, V. S. (1982) *Hydrodynamics of Collector Heat Exchange Devices*. Moscow, Energoizdat. 223 p. (in Russian).

11. Lebedev, A. V. (1988) *Vliianie Geometrii Zernistogo Sloia na Ego Gidrodinamicheskie i Teplovyie Kharakteristiki. Dis. kand. tekhn. nauk* [Influence of Geometry of Granular Bed on its Hydrodynamic and Heat Characteristics. Dissertation of Candidate of Technical Sciences]. Novosibirsk, ITF. 156 p. (in Russian).

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 14.04.2014