

10. K o s t y u k, A. G., & Trukhniy, A. D. (2005) Commensuration of the Active and Passive High-Pressure Cylinders of the Steam Turbines. *Teploenergetika* [Heat Power Industry], 6, 2–13 (in Russian).

11. N e u i m i n, V. M. (2013) On Perspectives of Upgrading T-250/300-23,5 Turbines. *Nadezhnost' i Bezopasnost' Energetiki* [Reliability and Safety in Electric-Power Industry], 3 (22), 62–65 (in Russian).

12. N e u i m i n, V. M. (2014) On the Subject of Selecting the Length of the Exhaust Blade of the High-Capacity Turbine in TPP. *Energetik* [Power Engineer], 1, 15–20 (in Russian).

13. N e u i m i n, V. M. (2013) The Results of Economic and Exergy Analyses of the TPP on Conventional Gas. *Energetik* [Power Engineer], 7, 2–5 (in Russian).

Представлена кафедрой ТЭС БНТУ

Поступила 01.12.2014

УДК 621.039.542:[532.546.6+532.5.031]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ТОЛСТЫМ ВРАЩАЮЩИМСЯ СЛОЕМ МИКРОТВЭЛОВ ДЛЯ ТРАНСМУТАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Канд. техн. наук, доц. СОРОКИН В. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: sorokin.npp@gmail.com

Для эффективной трансмутации радиоактивных изотопов в стабильные с использованием нейтронов требуются высокие плотности потока нейтронов и спектр со значительной долей быстрых и резонансных нейтронов. Ряд сеансов облучения определенной длительностью по времени желательнее чередовать с переделами состава отходов. Количество таких изотопов в отработанном топливе коммерческого реактора составляет порядка 1 %, массы отдельных изотопов в загрузке – до нескольких десятков килограммов. Рассматривается перспективный ядерный реактор для трансмутации радиоактивных отходов в части принципиального устройства, теплофизики и гидродинамики. Активная зона реактора сформирована подвижными микровэлами, образующими устойчивый плотный кольцевой слой. Слой вращается внутри неподвижной вихревой камеры за счет энергии потока теплоносителя – воды. Микровэлы охлаждаются теплоносителем непосредственно.

Расчетная оценка мощности устройства с водой под давлением 1–5 МВт на 1 л слоя. Условие отсутствия кипения устанавливает наиболее значительные ограничения на мощность. Объем слоя ограничен несколькими десятками литров, поскольку с увеличением размера камеры уменьшаются ускорение вращения и сила, удерживающая микровэлы на свободной поверхности слоя. Для достижения критичности загрузки ядерного топлива при ограничениях на обогащение предлагается и обосновывается расчетами активная зона, составленная из нескольких слоев или слоя с большим отношением объема к площади поверхности. Вихревые камеры в случае активной зоны из нескольких слоев могут иметь объединенные выходы теплоносителя вдоль оси. Использование камер с противоположными закрутками в составных активных зонах с общим выходом позволяет уменьшить закрутку потока ниже вихревого реактора по ходу теплоносителя.

Ключевые слова: ядерный реактор, слой микровэлов, моделирование элементов, радиоактивные отходы.

Ил. 9. Библиогр.: 11 назв.

SIMULATION OF THE NUCLEAR-REACTOR ACTIVE-ZONE ELEMENTS WITH THICK ROTATING LAYER OF MICRO-PARTICLE FUEL FOR RADIOACTIVE WASTE TRANSMUTATION

SOROKIN V. V.

Belorussian National Technical University

The effective transmutation of radioactive isotopes into the stable ones with the use of neutrons requires the neutron high-flux and the spectra with significant part of fast and resonance neutrons. It is advisable to alternate a range of specified-duration irradiation sessions with revamping the composition of waste. The depleted fuel of the commercial reactor comprises near 1 % of such isotopes of their individual mass in the batch loading which amounts to several tens of kilograms. The article considers a perspective nuclear reactor for radioactive waste transmutation as regards its design, thermal physics and hydrodynamics. Mobile micro-particles of the fuel build up the active zone of the reactor and form a steady dense ring-shaped layer. The layer rotates within immovable vortex chamber using the energy of the coolant, i.e. water. The micro particles cool down with the coolant unmediated.

The formulaic valuation of the device capacity with water under pressure comes to 1–5 MW per 1 liter of the layer. The condition of avoided boiling sets the most restrictive limitations to the capacity. The bulk of the layer constricts to tens of liters inasmuch as enlarging the chamber dimensions reduces the rotary acceleration and the force confining the fuel micro-particles on the free surface of the layer. The author offers and substantiates with calculations the active zone composed of several layers or a layer with a large ratio of the volume to the surface area for achieving criticality of nuclear fuel load with limitations on enrichment. The vortex chambers in case of the active zone of several layers can have the joint coolant exscapes along the axis. Implementation of the chambers with reverse vortices in composite active zones with joint escapes allows reducing the flow rotation below the vortex reactor along the coolant course.

Keywords: nuclear reactor, fuel micro-particle layer, simulation of the elements, radioactive waste.

Fig. 9. Ref.: 11 titles.

Наиболее безопасным способом обращения с радиоактивными отходами является ядерное превращение излучающих изотопов, содержащихся в отходах, в стабильные ядра (трансмутация). Для эффективной трансмутации с использованием нейтронов требуются высокие плотности потока, спектр со значительной долей быстрых и резонансных нейтронов. Ряд сеансов облучения определенной длительности по времени желательно чередовать с переделами состава отходов [1–4]. Количество излучающих изотопов в отработанном топливе коммерческого реактора составляет порядка 1 %, массы отдельных изотопов в загрузке – до нескольких десятков килограммов [3]. Плотность потока нейтронов в активных зонах и продолжительность кампании коммерческих реакторов не оптимальны для трансмутации, величина плотности мала, а кампания велика. Актуально создание специализированного устройства для трансмутации. Подходящим вариантом могут быть реакторы с микротвэлами, непосредственно охлаждаемыми водой [5, 6].

Микротвэл представляет собой шарик, состоящий из топливного ядра, покрытого защитной оболочкой. Оболочки разделяют топливо и теплоноситель и обеспечивают удержание продуктов деления ядер. Малое тепловое сопротивление микротвэла создает предпосылки для достижения большой плотности мощности без опасного перегрева топлива [5].

Представляет интерес подвижная засыпка с возможностью несложной перегрузки на ходу и быстрого рассыпания в гарантированно подкритиче-

скую структуру при аварии. Одной из реализаций является устойчивый плотный вращающийся слой микротвэлов в радиально-окружном потоке воды внутри неподвижной вихревой камеры [6–8]. Схема устройства приведена на рис. 1. Вода проходит через слой, поддерживая его вращение и обеспечивая теплосъем. Высота камеры увеличивается к центру (расширение) для снижения сопротивления слоя повышению его устойчивости.

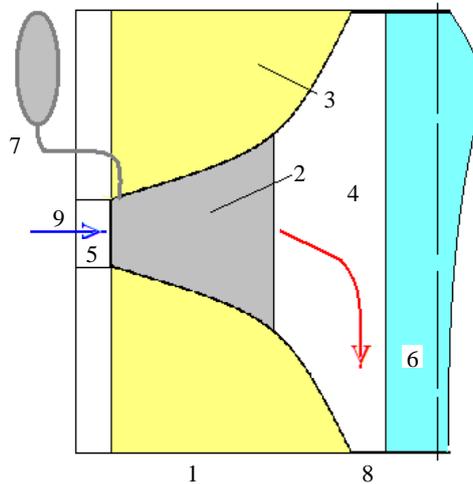


Рис. 1. Элемент активной зоны вихревого ядерного реактора: 1 – камера; 2 – слой; 3 – стенки; 4 – нагретая жидкость; 5 – холодная жидкость; 6 – каверна; 7 – устройство загрузки/выгрузки микротвэлов; 8 – отверстие выхода теплоносителя; 9 – отверстие входа теплоносителя (направляющий аппарат)

Для микротвэла диаметром $d = 2,0$ мм с равномерно тепловыделяющим ядром (1,5 мм) теплопроводностью 3,0 Вт/(м·К) (диоксид урана) и оболочкой толщиной 0,25 мм теплопроводностью 30,0 Вт/(м·К) (плотный пирографит, карбид кремния) при радиальной скорости воды $u = 1,0$ м/с и тепловом потоке на поверхности 1,0 МВт/м² относительно температуры теплоносителя получаем, используя известные формулы [9] и значение $Nu = 202$ ($Nu = 2 + 1,1Re^{0,6}Pr^{1/3}$, $Re = ud/\nu$ [10]), температуры: стенки шара 17 °С, границы топливного ядра 28 °С, центр ядра 251 °С. Мощность 1,0 л слоя составит 1,5 МВт (для сравнения – 0,11 МВт мощность 1,00 л активной зоны ВВЭР-1000). Поскольку соотношение приведенных мощностей примерно соответствует соотношению величин нейтронных потоков [9], устройство действительно позволит достигать высоких уровней нейтронного потока.

Кольцевая уплощенная структура является формой размещения делящегося материала в реакторах данного типа. Она обеспечивает устойчивость, однородность и малые уровни износа в слое частиц. Объем структуры ограничен несколькими десятками литров, поскольку с увеличением размера камеры уменьшаются ускорение вращения и сила удержания микротвэла на свободной поверхности слоя. Данный эффект иллюстрируется рис. 2. Безразмерный вес частицы на свободной границе $\bar{F} = (\text{вес в камере } R)/(\text{вес в камере } R_{150})$ приведен как функция безразмерного радиуса $\bar{R} = R/R_{150}$. Рассмотрены камеры с радиусами 75, 200, 300 и 400 мм. Все размеры, кроме ширины щелей и диаметра частиц, варьируются про-

порционально радиусу. Расчеты проведены по методу [11]. Эффект накладывает ограничения на размер устройств и массу засыпки частиц. Если в качестве предельного радиуса камеры выбрать 400,0 мм, то объем засыпки окажется 42,8 л, а масса шаров 214,0 кг.

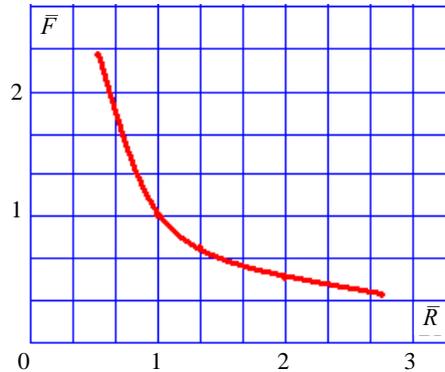


Рис. 2. Зависимость веса частицы на свободной границе от радиуса камеры

Кроме того, в камере большего размера условия закипания воды достигаются при меньшей мощности энерговыделения. Для камеры радиусом 150,0 мм при давлении 5,5 МПа, температуре воды на входе 180 °С и при подогреве 50 °С возможно снять тепловую мощность 5,0 МВт на 1 л слоя. Тепловая мощность устройства составит $2,25 \text{ л} \cdot 5,0 \text{ МВт/л} = 11,2 \text{ МВт}$. Слой устойчив, кипения воды не ожидается. Для камеры радиусом 300,0 мм при тех же условиях и перегреве достижима тепловая мощность 2,5 МВт на 1 л слоя, а устройства – 50,0 МВт на 1 л слоя. При большем абсолютном давлении мощность по условию отсутствия кипения можно увеличивать.

Для достижения критичности загрузки ядерного топлива при ограничениях на обогащение обычно увеличивают размер активной зоны и стремятся снизить утечку нейтронов. В рассматриваемом случае эти факторы ограничены принципиально, поэтому целесообразно рассмотреть прием составления активной зоны вихревого реактора с подвижным слоем микротвэлов из нескольких камер или поискать форму камеры с большим отношением объем/поверхность. Рассчитаем несколько вариантов. За основу сравнения примем устройство с параметрами: число щелей в направляющем аппарате $n = 36$; относительное проходное сечение $m = 0,07$; радиус камеры $R_1 = 150 \text{ мм}$; радиус центрального отверстия $R_3 = 40 \text{ мм}$; высота камеры $h(R_1) = 30 \text{ мм}$; $d = 2 \text{ мм}$; коэффициент трения частиц о стенку $\mu = 0,15$; плотность воды $\rho_f = 1000 \text{ кг/м}^3$ и микротвэлов $\rho_s = 10000 \text{ кг/м}^3$; радиус свободной границы $R_2 = 75 \text{ мм}$; пористость $\varepsilon = 0,49$; избыточное давление в ресивере 0,6 МПа; один выход, гиперболическое расширение. Выход теплоносителя может осуществляться в одно и два отверстия в центре торцевой крышки. Варианты представлены на рис. 3.

Наличие второго выхода уменьшает гидравлическое сопротивление устройства, расход возрастает на 5 %, увеличиваются скорость вращения слоя и устойчивость до 1,09. За меру устойчивости принято отношение весов частиц на свободной границе, рассматриваемого и слоя сравнения.

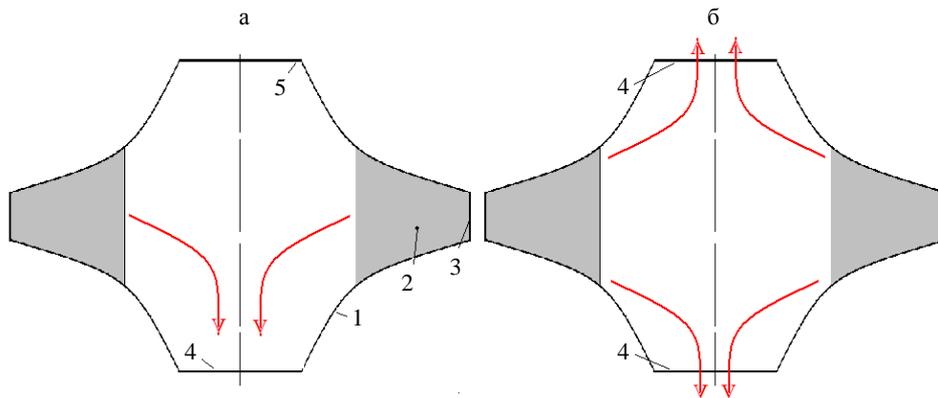


Рис. 3. Организация выхода из камеры: а – один выход; б – два выхода;
1 – камера; 2 – слой; 3 – направляющий аппарат; 4 – выход; 5 – выход закрыт

Объем слоя формируется между вогнутых стенок камеры. Переход к более выпуклым очертаниям, по крайней мере в области слоя, повысит его объем при той же толщине. Пусть расширение стенки описывается функцией $2,33-1,33(r/R_1)^2$. В начале и конце слоя такая стенка пространственно совпадает с гиперболической. В промежутке образует дополнительный объем для размещения частиц. Устройство показано на рис. 4. За слоем гиперболические очертания стенки одинаковы для обоих устройств.

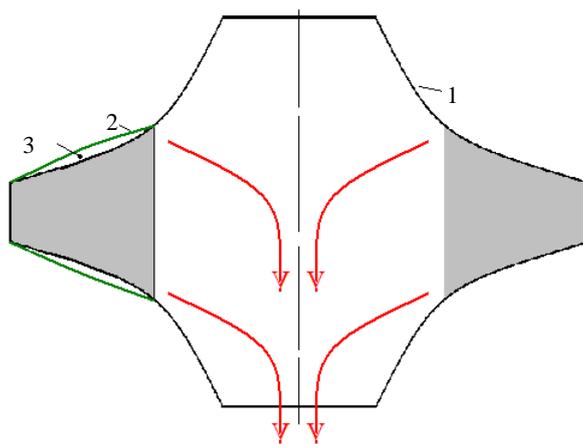


Рис. 4. Влияние формы камеры: 1 – гиперболическая стенка;
2 – выпуклая стенка; 3 – дополнительный объем камеры

Наличие выпуклости уменьшает гидравлическое сопротивление устройства, снижаются скорость вращения слоя и устойчивость (до 0,7). Загрузка (отношение масс частиц в слое) повышается на 12 %.

Радикальное увеличение массы загрузки возможно для многокамерной компоновки активной зоны. Возможен вариант установки системы гидравлически независимых камер с нейтронной связью. Это усложняет систему, но принципиальных затруднений не вызывает. Рассмотрим подробнее другой случай, когда используются несколько камер с независимыми входами и общим выходом. Две конфигурации приведены на рис. 5 и 6. Возможность объединять выходы связана с наличием приосевой кавер-

ны 6 (рис. 1). При объединении потоков каверна сжимается и формируется сечение для отвода дополнительного расхода теплоносителя.

Две камеры, соединенные общим выходом в одну сторону, представлены на рис. 5. Из верхней камеры теплоноситель поступает в приосевую зону нижней, затем теплоносители обеих камер выводятся из нижнего отверстия нижнего устройства (устойчивость 0,81).

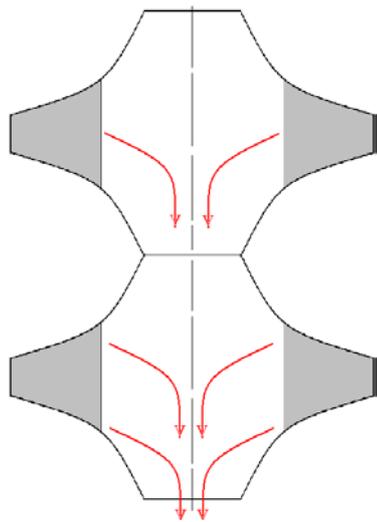


Рис. 5. Общий выход в одну сторону

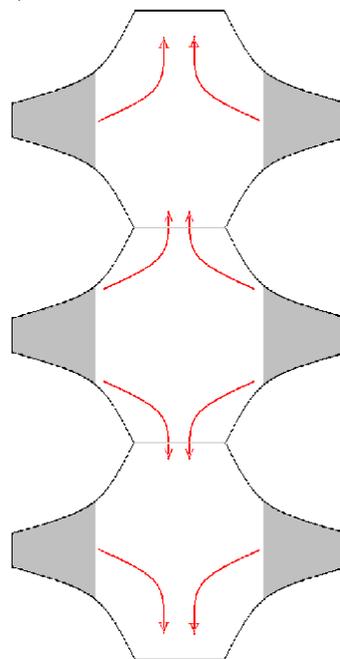


Рис. 6. Общий выход в две стороны

На рис. 6 показаны три камеры, соединенные общим выходом в две стороны. Из средней камеры теплоноситель поступает в приосевую зону нижней и верхней камер, затем теплоносители из всех камер выводятся из нижнего и верхнего устройств. В этом случае расходная нагрузка на линии вывода теплоносителя меньше, чем в устройстве на рис. 5 (устойчивость 0,91).

Применение чисто гиперболических камер с общим выходом неудобно, поскольку вытянутость отдельных устройств вдоль оси приводит к повышению общего осевого размера системы, а слои в камерах оказываются удаленными друг от друга. Пусть торцевая стенка камеры выполнена гиперболической до свободной границы слоя, а далее плоской согласно рис. 7. В сравнении с гиперболической камерой (рис. 7а) плоская камера (рис. 7б) короче в осевом направлении на длину фрагментов 1 и 2 (устойчивость 0,83). Камера с общим выходом (рис. 7в), составленная из устройств типа (б), также выходит короче.

В многокамерной зоне с общим выходом можно достичь еще одного полезного эффекта. Поток теплоносителя из одной камеры выходит закрученным, что может осложнить его последующий транспорт через трубы, баки, фитинги и насосы. Установка традиционного раскручивателя потока типа вставки может ухудшить условия рассыпания активной зоны.

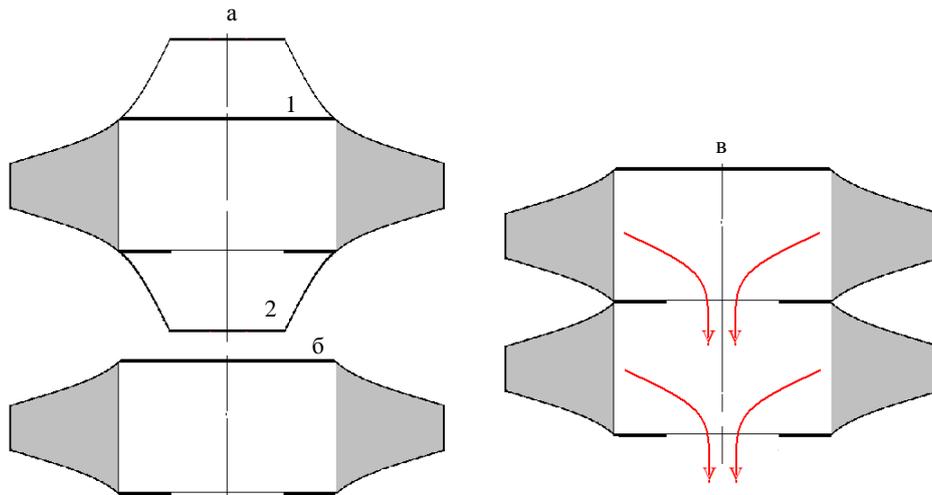


Рис. 7. Гиперболическая и плоская камеры

Если же использовать две камеры с противоположными направлениями закрутки и общим выходом (рис. 8), то эффект закрутки потока исчезает или сильно ослабевает (рис. 9). При этом внутри камеры противоположно закрученные течения не успевают перемешаться, и характер течения в приосевой зоне остается таким, как в одиночном устройстве.

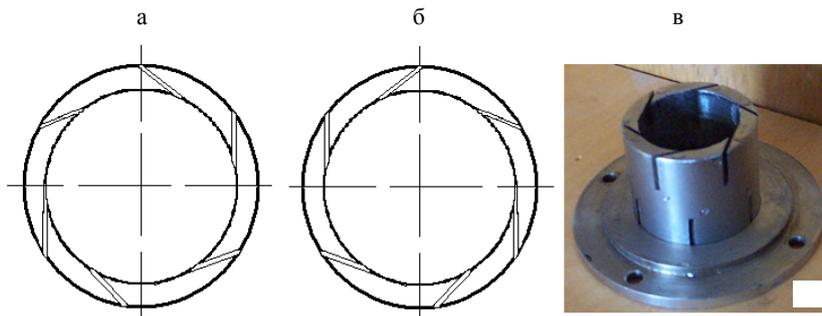


Рис. 8. Раскручивание потока на выходе за счет устройства направляющего аппарата:
а – с закруткой по часовой стрелке; б – то же против часовой стрелки;
в – двухкамерное устройство

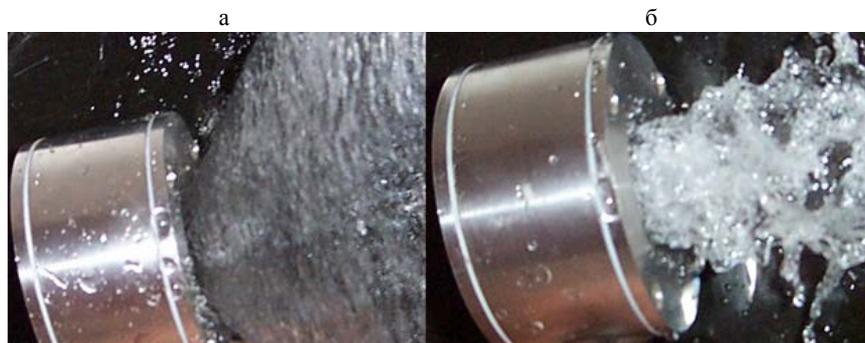


Рис. 9. Раскручивание потока на выходе с формой струи:
а – конической вследствие закрутки; б – цилиндрической в результате раскрутки

ВЫВОДЫ

1. Реакторы с микровзлами в форме устойчивого, плотного, вращающегося слоя, непосредственно охлаждаемого водой, перспективны для использования при трансмутации радиоактивных отходов. Расчетная оценка мощности устройства с вращающимся слоем, продуваемым водой под давлением, составляет величину порядка 1–5 МВт на 1 л слоя. Условие отсутствия кипения устанавливает наиболее значительные ограничения на мощность.

2. Активная зона вихревого ядерного реактора для достижения критичности может быть составлена из нескольких вихревых камер с вращающимся слоем микровзлов. Камеры могут иметь отдельные гидравлически независимые и/или объединенные выходы теплоносителя. Формы камер могут быть отличны от гиперболической в зоне слоя и/или приосевой зоне жидкости. В составных активных зонах камеры влияют на гидродинамические параметры друг друга, в частности на параметры устойчивости слоя. Использование камер с противоположными закрутками в составных активных зонах с общим выходом позволяет уменьшить закрутку потока ниже вихревого реактора по ходу теплоносителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. А р т и с ю к, В. В. Развитие физико-технических основ трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов ядерных реакторов: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.14.03 / В. В. Артисюк. – Обнинск, 2002. – 34 с.
2. G u d o w s k i, W. Nuclear Waste Management. Status, Prospects and Hopes / W. Gudowski // Nuclear Physics A. – 2005. – Vol. 752. – P. 623–632.
3. S t a t u s of Minor Actinide Fuel Development. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. – 81 p. (IAEA Nuclear Energy Series no NF-T-4.6). – STI/PUB/1415.
4. С л а б о с п и ц к и й, Р. П. Анализ особенностей различных методов трансмутации РАО / Р. П. Слабоспицкий // Вісник Харківського національного університету. Сер. фізична «Ядра, частинки, поля». – 2011. – Т. 946, вип. 1. – С. 43–49.
5. С о р о к и н, В. В. Гидравлика и теплообмен шаровых засыпок в условиях активной зоны водо-водяных ядерных реакторов с микровзлами / В. В. Сорокин. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 191 с.
6. С о р о к и н, В. В. Гидродинамика вращающегося плотного слоя микровзльного ядерного топлива с водяным теплоносителем / В. В. Сорокин // IV конгресс физиков Беларуси: сб. науч. трудов. – Минск: Ковчег, 2013. – С. 35–36.
7. Г о л ь д ш т и к, М. А. Процессы переноса в зернистом слое / М. А. Гольдштик. – Новосибирск: Институт теплофизики, 2005. – 358 с.
8. С о р о к и н, В. В. Моделирование процесса удержания толстого вращающегося слоя частиц в вихревой камере / В. В. Сорокин // Доклады НАН Беларуси. – 2009. – Т. 53, № 5. – С. 100–103.
9. Д е м е н т ь е в, Б. А. Ядерные энергетические реакторы / Б. А. Дементьев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 280 с.
10. К а в и а н у, М. Principles of Heat Transfer in Porous Media / M. Kaviany. – NY: Springer-Verlag, 1991. – 626 p.
11. С о р о к и н, В. В. Расчет параметров толстого вращающегося слоя частиц в вихревой камере / В. В. Сорокин // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2013. – № 4. – С. 88–92.

REFERENCES

1. A r t i s y u k, V. V. (2002) *Razvitie Fiziko-Tekhnicheskikh Osnov Transmutatsii Dolgozhivushchikh Radioaktivnykh Otkhodov Iadernykh Reaktorov. Avtoref. Diss. Doktora Fiziko-Matematicheskikh Nauk* [The Evolution of the Physicotechnical Transmutation Principles of the

Nuclear-Power Reactor Long-Life Radioactive Waste. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Obninsk. 34 p. (in Russian)

2. G u d o w s k i, W. (2005) Nuclear Waste Management. Status, Prospects and Hopes. *Nuclear Physics A*, 752 (1–4), 623–632. Doi: 10.1016/j.nuclphysa.2005.02.133.

3. S t a t u s of Minor Actinide Fuel Development. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. 81 p. (IAEA Nuclear Energy Series no NF-T-4.6).

4. S l a b o s p i t s k i y, R. P. (2011) Peculiarity Analysis of Various Methods of RAW-Transmutation. *Visnik Kharkivs'kogo Natsional'nogo Universitetu. Ser. Fizichna "Iadra, Chastinki, Polia"* [Herald of Kharkiv National University. Physics Series. Nuclei, Particles, Fields], 946, 43–49 (in Russian).

5. S o r o k i n, V. V. (2010) *Hydraulics and Heat Exchange of the Globular-Covering Under Conditions of Active Zone of the Water-Moderated Water-Cooled Reactors with Minute Particles*. Minsk, Science of Belarus. 191 p. (in Russian).

6. S o r o k i n, V. V. (2013) Hydrodynamics of the Rotating Compact Layer of Minute-Particle Nuclear Fuel with Water Heat-Transfer Agent. *IV Congress of Belarusian Physics. Collection of Scientific Papers*. Minsk, Kovcheg, 35–36 (in Russian).

7. G o l' d s h t i k, M. A. (2005) *Transfer Processes in Granular Layer*. Novosibirsk, Institute of Thermal Physics. 358 p. (in Russian).

8. S o r o k i n, V. V. (2009) Simulation of the Holdup Process for Thick Rotating Layer of Particles in the Cyclone Chamber. *Doklady Natsional'noi Akademii Nauk Belarusi* [Reports of the National Academy of Sciences of Belarus], 53 (5), 100–103 (in Russian).

9. D e m e n' e v, B. A. (1984) *Nuclear-Power Reactor*. Moscow, Energoatomizdat. 280 p. (in Russian).

10. K a v i a n y, M. (1991) *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. NY, Springer-Verlag. 626 p.

11. S o r o k i n, V. V. (2013) Parameter Computation of Thick Rotating Layer of Particles in the Cyclone Chamber. *Izvestiia Natsional'noi Akademii Nauk Belarusi. Ser. Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], 4, 88–92 (in Russian).

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 24.11.2014

УДК 621.694.2

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРУЙНОГО НАСОСА ПРИ МАЛЫХ КОЭФФИЦИЕНТАХ ЭЖЕКЦИИ

Канд. техн. наук, доц. БУТЕНКО А. Г., СМЫК С. Ю.

Одесский национальный политехнический университет

E-mail: alex_butenko@ukr.net

Струйные насосы широко применяются как в энергетике, так и в других отраслях техники. Их основным недостатком является невысокая эффективность работы, который усиливается при работе струйных насосов с малым коэффициентом эжекции. Такие режимы работы иногда обусловлены характером технологического процесса, и поэтому их невозможно избежать. Статья посвящена поиску путей повышения эффективности работы центральных эжекторов при малых коэффициентах эжекции.

Путем математического моделирования изучены особенности кинематической структуры потока в камере смешения центрального эжектора, работающего с малыми коэффициентами эжекции. Математическое моделирование проводили с помощью прикладного пакета Solid Works Cosmos Flo. Показано, что в таких условиях у стенок камеры смешения образуются зоны обратных течений, которые снижают эффективность работы струйного аппарата. Потери энергии тем больше, чем большие размеры обнару-