

ПРИМЕНЕНИЕ НЕПРОТОЧНОЙ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ ПРИ РАЗДЕЛКЕ ОЯТ РЕАКТОРОВ АМБ

WATER ULTRAFILTRATION FOR DISMANTLEMENT OF AMB'S SPENT NUCLEAR FUEL

Ю.В. КАРЛИН, *д.х.н.*
(ГУП МосНПО «Радон»),
В.А. КИЧИК, *к.т.н.*,
Е.Н. СТАРИКОВ, *к.т.н.*
(ООО «ГИДРОТЕХ»)



Yu.V. KARLIN,
Doctor of Chemical Science
(SUE SIA Radon Moscow),
V.A. KICHIK,
Candidate of Technical Science,
E.N. STARIKOV,
Candidate of Technical Science
(GIDROTEKH Ltd.)

■ **Метод полуволоконной непроточной ультрафильтрации для очистки воды от загрязнений полидисперсного состава может быть эффективно использован в системе оборотного водоснабжения при обращении с отработавшим ядерным топливом.**

При обращении с отработавшим ядерным топливом – долговременном хранении в бассейнах выдержки или последующей переработке – часто возникает проблема, связанная с аварийным состоянием отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) и чехлов или кассет, в которых они хранятся. В частности, подобная ситуация возникла на Белоярской АЭС с ОТВС типа АМБ, которые размещены в кассетах, изготовленных как из легированной, так и из углеродистой стали. Для решения этой проблемы предложено разделить указанные кассеты в специальном бассейне под слоем воды непосредственно на Белоярской АЭС, отделить топливную составляющую ОТВС от твердых радиоактивных отходов (ТРО), загрузить ее в специальные пеналы и отправить на завод для дальнейшей переработки [1].

Очевидно, что при таком технологическом подходе основными требованиями к воде в бассейне разделки являются:

- прозрачность, необходимая для визуального контроля операций;
- такой уровень удельной активности, чтобы облучение любого исполнителя работ не превышало 20 мЗв/год, согласно нормам радиационной безопасности, действующим в Российской Федерации.

Указанные требования можно обеспечить путем организации оборотного водоснабжения бассейна разделки, причем вода, поступающая из бассейна, перед ее возвратом в бассейн пропускается через установку спецводоочистки (СВО) [1].

Основными технологическими операциями в установке СВО являются осветление воды (по возможности, полная очистка от всех взвешенных и коллоидных частиц), а также выведение из воды γ -активных радионуклидов, в данном случае – ^{137}Cs . Подобная установка уже более 10 лет эксплуатируется на Белоярской

■ **The method of hollow-fibre dead-end ultrafiltration that has been applied for treatment of water to remove polydisperse-composition contaminations can be effectively employed in recycling water supply systems used during management of spent nuclear fuel.**

Management of spent nuclear fuel – including its long-term storage in pools and subsequent reprocessing – is often associated with the problem represented by the heavily deteriorated condition of the spent fuel assemblies (SFAs) themselves or the canisters (casks) that accommodate them. In particular, this type of situation has occurred on Beloyarsk NPP with AMB reactor SFAs placed inside canisters, of which some are made of alloyed and some of carbon steel. In order to resolve the problem, it was suggested that the canisters be cut inside a special pool under a layer of water directly on Beloyarsk NPP, that the fuel components of the SFAs be separated from the solid radioactive waste, loaded into special casks and sent to the reprocessing facility [1].

Obviously, for this technological approach to be implemented, the water in the pool will be expected to correspond to the following key requirements:

- be clear enough to provide sufficient transparency for visual observation of the operations;
- have levels of specific radioactivity so that exposure of any operator involved with the performance of the activities will not exceed 20 mSv/year, in accordance with the radiation safety regulations in place in the Russian Federation.

These requirements can be met through implementation of recycling water supply in the pool where the cutting operation will be performed, so that water exiting the pool will undergo special treatment before being fed back into the pool [1].

Key process operations in the corresponding water treatment plant should then be water clarification (removal of all suspended and colloid particles if feasible), as well as removal of γ -emitting radionuclides, in this particular case ^{137}Cs . A similar installation has already been in operation on Beloyarsk NPP for more than 10 years,



Рис. 1. Ультрафильтрационный модуль с одноканальными (1) и многоканальными (2) волокнами
 Fig. 1. Ultrafiltration modules with single-channel (1) and multi-channel (2) fibres

АЭС для очистки воды в бассейнах выдержки ОЯТ [2]. Для очистки от взвешенных и коллоидных частиц вода из бассейнов выдержки пропускается через насыпной фильтр с гранулированным диоксидом титана, а затем через фильтр с синтетическим неорганическим сорбентом типа «Термоксид-3А» или «Термоксид-35», который избирательно извлекает из воды изотопы ^{137}Cs с коэффициентом очистки 10^2 - 10^4 . При разделке кассет с ОТВС количество взвесей в воде, подаваемой на установку СВО, резко возрастает. Есть основания предполагать, что насыпной фильтр не сможет обеспечить приемлемого качества очистки воды от взвешенных и коллоидных частиц – металлических и графитовых опилок, гидроокисных соединений железа (ржавчины, накопившейся, главным образом, на кассетах из углеродистой стали), продуктов взаимодействия воды и матрицы топливных элементов (металлического магния и кальция).

МЕТОД ПОЛОВОЛОКОННОЙ НЕПРОТОЧНОЙ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ

В последние несколько десятилетий интенсивно развиваются технологии переработки ЖРО с использованием мембранных методов. Одним из них является ультрафильтрация [3], в ходе которой на мембранах полностью задерживаются взвеси, коллоидные частицы, эмульсии, большая часть высокомолекулярных веществ, бактерии.

Производительность мембранного аппарата напрямую связана с удельной фильтрующей поверхностью (плотностью упаковки мембран в аппаратах), $S_{уд}$. Значение $S_{уд}$ рассчитывается как площадь поверхности мембран в 1 м^3 мембранного аппарата. $S_{уд}$ для большинства аппаратов фильтр-прессного и трубчатого типов составляет 60 - $300 \text{ м}^2/\text{м}^3$, рулонного (или спирального) – 300 - $800 \text{ м}^2/\text{м}^3$, волоконного – до $30000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ [4,5]. Очевидно, что технологии очистки воды, использующие мембранные аппараты волоконного типа, позволяют при минимальных габаритах получить максимальную производительность по фильтрату (пермеату).

Для очистки ЖРО предлагается метод непроточной ультрафильтрации с использованием полых полимер-

used for treatment of spent fuel storage pool water [2]. In order to remove suspended and colloid particles, the water from the storage pools is fed through a bulk filter that uses granulate titanium dioxide, and then through a filter that uses a synthetic non-organic absorbent such as Thermoxide-3A or Thermoxide-35, which selectively remove ^{137}Cs isotopes from the water, providing a decontamination factor of 10^2 - 10^4 . If fuel assemblies are cut inside the pool, the amount of suspended particles present in the water supplied to the treatment plant will increase sharply. There is basis to believe that the bulk filter will not be able to provide an acceptable level of water purification from suspended and colloid particles (such as metallic and graphite saw powder, hydroxide compounds of iron (particles of rust that has chiefly built up on those canisters that are made of carbon steel), products of interaction between water and the fuel matrix material (metallic magnesium and calcium).

HOLLOW-FIBRE DEAD-END ULTRAFILTRATION METHOD

Over the past few decades, major advancements have been made in the development of the liquid radwaste processing technology using membrane methods. One of these methods is ultrafiltration [3], which provides for complete entrapment of suspended particles, colloid particles, emulsions, most of macromolecular substances and bacteria by the membranes.

Capacity of the membrane unit is directly linked to its S_{spec} – specific filtration surface (density of the membrane packages in the unit). S_{spec} is calculated as membrane surface area per 1 м^3 of the membrane unit. For most filter-press and tube-filter units, S_{spec} ranges within 60 - $300 \text{ м}^2/\text{м}^3$, for roll-filter (or spiral-filter) units it lies within 300 - $800 \text{ м}^2/\text{м}^3$, and for fibre-filter units it reaches up to $30,000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ [4,5]. Obviously, fibre-based membrane filtering water treatment technologies provide maximum filtrate (permeate) production capacity while keeping size to a minimum.

The method proposed for treatment of liquid radioactive waste is dead-end ultrafiltration using hollow polymer fibres with the filtration rating (average size of particles entrapped by the membrane) of 20 nm . Over

ных волокон с рейтингом фильтрации (средний размер частиц, отсекаемых мембраной), равным 20 нм. В последние десятилетия этот метод получил широкое распространение в общепромышленной водоподготовке, благодаря высокой производительности и компактности оборудования [6]. Используются ультрафильтрационные модули с волокнами длиной до 1,5 м. Волокна могут иметь один или (в многоканальном варианте) семь рабочих каналов (рис. 1). Диаметр рабочего канала в волокне – 0,9 или 1,5 мм. Селективный (делящий) слой находится на внутренней поверхности рабочих каналов волокна.

Суть метода полволоконной непроточной ультрафильтрации заключается в чередовании циклов длительной фильтрации водного раствора через волокно (десять минут) и быстрой обратной промывки (десять секунд), когда взвеси, накопленные в объеме рабочего канала волокна, выносятся из мембранного аппарата в виде концентрата [7].

Нерастворимые загрязнения, образующиеся при разделке сборок, имеют сложный полидисперсный состав с размером частиц от десятков нанометров до нескольких миллиметров. При определении размеров частиц различных материалов, которые могут попасть в установку СВО из бассейна разделки кассет с ОТВС, следует учесть, что максимальная скорость потока воды реализуется в заборном сечении бассейна. По нашим оценкам, для бассейна Белоярской АЭС она не может превышать 0,01 м/с (объем бассейна – до 50 м³, производительность установки СВО – до 30 м³/ч). В консервативном варианте можно увеличить это значение до 0,1 м/с.

Всасывающая линия основного насоса, забирающего воду из бассейна, находится выше его дна. Будут ли такие частицы подниматься вихревыми потоками воды, которые неизбежно будут возникать в бассейне, плотно заставленном оборудованием? Если принять приближение, что частицы имеют сферическую форму, то для решения этого вопроса можно использовать уравнение Стокса [8]:

$$V_{oc} = \frac{d^2 g (\rho_u - \rho_w)}{18\mu} \quad (1),$$

где V_{oc} – скорость осаждения частицы,
 d – диаметр частицы,
 ρ_u – плотность частицы,
 ρ_w – плотность воды,
 μ – статическая вязкость воды,
 g – ускорение силы тяжести.

На рисунке 2 показаны расчетные скорости осаждения для графита ($\rho_{gp}=2200$ кг/м³) и металлических частиц циркония ($\rho_{Zr}=6450$ кг/м³), железа ($\rho_{Fe}=7874$ кг/м³) и урана ($\rho_U=19040$ кг/м³) при различных размерах частиц. Очевидно, что частицы графита могут попасть на вход заборного насоса СВО во всем диапазоне их размеров, частицы циркония и железа, а возможно и частицы урана с размерами 100-200 мкм – при интенсивном завихрении воды. Такие абразивные частицы при коагуляции, которая неизбежно будет происходить, могут образовать большие агрегаты, что потенциально может привести к закупориванию входного участка ра-

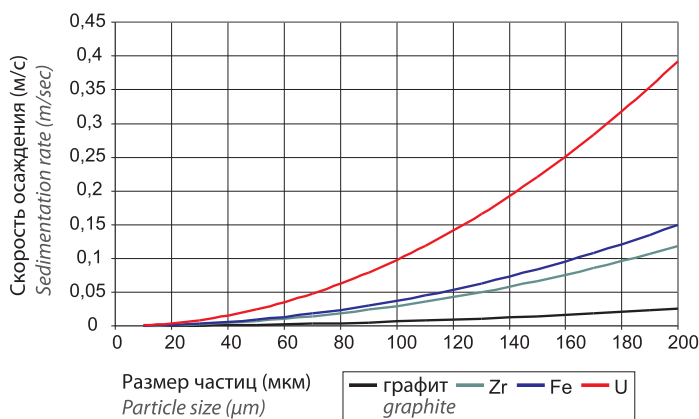


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения частиц графита и металлов от их размеров

Fig. 2. Settling rate of graphite and metal particles as a function of particle size

the recent decades, this method has found numerous applications in general industrial water treatment thanks to its high production rate and compact equipment size [6]. Ultrafiltration modules with fibres lengths up to 1.5 m are in use. The fibres may have a single or (in the multi-channel version) seven active channels (fig. 1). The active channel diameter in the fibre is 0.9 or 1.5 mm. The selective (separating) layer is located on the inner surface of the active channels in the fibres.

The essence of the hollow-fibre dead-end ultrafiltration method is alternation between the cycles of long filtration of the water solution through the fibres (dozens of minutes) and quick back-flushing (dozens of seconds), when the suspended particles trapped inside the active channels of the fibres are washed out of the membrane unit as concentrate [7].

Non-soluble contaminations formed during the cutting of fuel assemblies will have a complex polydisperse composition, with particle size ranging from dozens of nanometres to a few millimetres. When determining the particle sizes of various materials that may arrive to the water treatment plant from the pool where the canisters containing SFAs are cut, we need to take into account that the maximum water flow rate occurs in the intake cross-section of the pool. According to our evaluations, for the Beloyarsk NPP pool it will not exceed 0.01 m/sec (the volume of the pool is up to 50 m³, and the water treatment plant capacity is up to 30 m³/hour). Conservatively, that value may be increased to 0.1 m/sec.

The suction line of the main pump that takes water in from the pool is positioned above its bottom level. Will such particles be raised by the eddy currents of water that will inevitably occur in the pool that is densely loaded with equipment items? Assuming that the particles are approximately spherical in their shape, the Stokes equation may be used to resolve this problem [8]:

$$V_{sett} = \frac{d^2 g (\rho_p - \rho_w)}{18\mu} \quad (1),$$

where V_{sett} is settling rate of the particle,
 d is particles diameter,
 ρ_p is particle density,
 ρ_w is water density,

бочего канала ультрафильтрационного волокна. Поэтому рекомендуется до стадии полочной непроточной ультрафильтрации использовать предочистку для отсеивания частиц с размерами более 100 мкм. Для этого можно использовать фильтрацию через сетчатые или пружинные фильтры.

ОПЫТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Оценку работоспособности предлагаемого метода глубокой очистки воды от взвешенных и коллоидных частиц проводили с использованием небольшой опытной установки, изготовленной ООО «ГИДРОТЕХ». При испытаниях использовали многоканальные и одноканальные полочные элементы с длиной волокон 520 мм (рис. 1) с диаметром рабочего канала в волокнах 0,9 мм (семь каналов) и 1,5 мм (один канал), общее число волокон – 60 и 150, общая площадь фильтрации – 0,5 м² и 0,4 м² соответственно.

В качестве модели нерастворимых полидисперсных загрязнений, образующихся при разделке ОЯТ АМБ, использовали водную суспензию измельченных ржавчины и реакторного графита с общим содержанием около 20 мг/л. Образец ржавчины был получен осаждением гидроксида железа из раствора FeCl₃ при добавлении раствора NaOH (химический гидроксид железа), часть гидроксида железа – путем электрохимического растворения анодов из углеродистой стали (электрохимический гидроксид железа). Далее проводили термическую обработку осадка для разложения гидроксида железа до окисных соединений. Крупные куски ржавчины измельчали в шаровой мельнице, затем на вибросите отбирали фракцию диаметром менее 100 мкм. Аналогично поступали и с реакторным графитом.

Очищаемый раствор с помощью центробежного насоса подавали внутрь ультрафильтрационного модуля по следующей схеме: подача с одного торца модуля – обратная промывка – подача с другого торца модуля – обратная промывка. Относительно поверхности мембран все используемые режимы были тупиковыми. Очищенный раствор возвращали в емкость исходного раствора, а полученный концентрат сбрасывали в сборник концентрата. Обратную промывку проводили технической водой из водопровода. Переключение режимов подачи воды осуществляли при помощи системы клапанов, управляемых процессором блока управления.

Испытания ультрафильтрационного модуля с диаметром рабочего канала 0,9 мм носили предварительный характер и были проведены только с использованием измельченной ржавчины без графита. Диапазон изменения концентрации ржавчины в растворе составил от 28 мг/л до 128 мг/л. Рабочее давление в ультрафильтрационном аппарате – 0,055-0,18 МПа. Было обнаружено, что при концентрации ржавчины 128 мг/л ультрафильтрационный модуль работает нестабильно и начинает снижать производительность. Промывка поверхности мембран раствором 25 г/л лимонной кислоты по-



Рис. 3. Общий вид непроточной ультрафильтрационной установки с многоканальными волоконными элементами

Fig. 3. Overall view of the dead-end ultrafiltration unit featuring multi-channel fibre elements

μ is static viscosity of water,
 g is gravity.

Figure 2 shows computed values of settling rate for graphite ($\rho_{gr} = 2,200 \text{ kg/m}^3$) and metallic particles of zirconium ($\rho_{Zr} = 6,450 \text{ kg/m}^3$), iron ($\rho_{Fe} = 7,874 \text{ kg/m}^3$) and uranium ($\rho_U = 19,040 \text{ kg/m}^3$) for various particle sizes. Obviously, graphite particles entering the intake pump of the water treatment plant may be of any size within their range, and zirconium and iron, and possibly even uranium particles 100-200 μm in size may be sucked in if water turbulence is strong enough. Coagulation of such abrasive particles, which will inevitably occur, can lead to formation of large aggregates, potentially clogging the intake areas of the active channels in the ultrafiltration fibres. It is therefore recommended to arrange a pre-screening stage before the hollow-fibre dead-end ultrafiltration, so that particles larger than 100 μm can be pre-removed. That can be achieved by pre-running the flow through mesh or spring filters.

PILOT TESTS

Feasibility of the proposed method for treatment of water to remove suspended and colloid particles was assessed using a small pilot installation manufactured by GIDROTEKH Ltd. The tests were performed using both multi-channel and single-channel hollow-fibre elements with fibres 520 mm long (fig. 1) with diameter of active channel in the fibres 0.9 mm (seven channels) and 1.5 mm (one channel), total number of fibres 60 and 150, total filtration surface area 0.5 m² and 0.4 m², respectively.

The insoluble polydisperse contaminants generated from cutting of AMB spent fuel were simulated using a water suspension of ground rust and reactor-type graphite with total salt content approximately 20 mg/litre. The rust simulation was obtained by sedimentation of iron hydroxide from a FeCl₃ solution with a NaOH solution (chemical iron hydroxide added), some iron hydroxide

зволила полностью восстановить производительность ультрафильтрационного модуля приблизительно за 1 ч.

Общую шламоемкость модуля можно оценить как 0,139 л. Если принять обводненность шламов гидроксида железа равной 90%, то в волокнах их может находиться не более 14 г в пересчете на сухую гидроокись железа. По-видимому, на практике заполнение шламами более 10% объема волокон приводит к серьезным проблемам с их отмывкой.

Итогом первой стадии исследований явилось экспериментальное определение оптимального режима работы ультрафильтрационного модуля. При концентрации в модельном растворе ржавчины 56-77,2 мг/л модуль работал устойчиво в следующем режиме фильтрации: подача с одного торца модуля – подача с другого торца модуля – обратная промывка – обратная промывка с другого торца модуля. Средняя удельная производительность модуля составила 86 л/м²*ч при температуре раствора на входе от +24-30°C. Рабочее давление раствора на входе в модуль – 0,18 МПа. Доля вторичных отходов с концентрацией ржавчины около 1 г/л составила до 8% объема переработанного раствора.

На второй стадии исследований использовали одноканальный модуль с диаметром рабочего канала 1,5 мм. Испытания проводили на модельном растворе со смесью измельченных частиц ржавчины (150 мг/л) и графита (10 мг/л).

Режим фильтрации: подача с одного торца модуля – обратная промывка – подача с другого торца модуля – обратная промывка. Давление на входе модуля – 0,16-0,22 МПа. Испытания проводили в течение 27 суток в периодическом режиме (5-6 часов работы, 18-19 часов перерыва). Производительность модуля оставалась постоянной на всем протяжении испытаний и составляла 78±3 л/ч (при удельной производительности 195 л/м²*ч). Общее рабочее время фильтрации раствора составило 46 часов, за это время было профильтровано 3,6 м³ суспензии, получено 120 л концентрата с концентрацией по твердому осадку 4,7 г/л. Объем вторичных отходов составил 3,4% объема пропущенной воды.

ПРОЕКТ КОМПЛЕКСА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ

На основании проведенных испытаний в ООО «ГИДРОТЕХ» был выполнен технический проект комплекса ультрафильтрации для очистки от взвешенных частиц воды бассейна разделки ОЯТ АМБ Белоярской АЭС и разработана конструкция мембранного аппарата.

При проектировании использовали практический опыт, полученный в ходе испытаний непроточной ультрафильтрационной установки с волоконными элементами (рис. 3) при очистке воды Теченского каскада водоемов.

Главное отличие в конструкции установок связано с тем, что вода Теченского каскада водоемов относится к низкоактивным жидким отходам, тогда как вода из бассейна для разделки ОЯТ однозначно является ЖРО среднего уровня активности. Кроме того, правила для проектирования оборудования, которое будет эксплуатироваться на АЭС (даже остановленной), всегда жестче, и исполнение оборудования для пере-

produced by electrochemical dissolution of carbon steel anodes (electrochemical iron hydroxide). Then, the sediments were treated thermally in order for the iron hydroxide to disintegrate into oxidic compounds. Large pieces of rust were ground using a globe mill, and then a vibration sieve was used to separate out the particles less than 100 µm in size. Reactor-grade graphite was prepared in a similar fashion.

The solution to be treated was supplied using a centrifugal pump to inside the ultrafiltration module in the following sequence: feed-in from one side of the module followed by back-flushing followed by feed-in from the other side of the module followed by back-flushing. Relative to the membrane surface, all modes used were dead-end. The treated solution was returned to its original vessel, and the resulting concentrate discharged into the concentrate collector. Back-flushing was performed using service water from the water supply system. Water supply modes were changed using a system of valves controlled by the control unit processor.

Testing of ultrafiltration module with active channel diameter 0.9 mm was preliminary and was only performed using ground rust, without graphite. The concentration of rust in the solution ranged from 28 mg/litre to 128 mg/litre. Operating pressure in the ultrafiltration unit was 0.055-0.18 MPa. It was identified that with rust concentration of 128 mg/litre, operation of the ultrafiltration module becomes unstable and its production rate begins to decrease. Washing the membrane with a 25 g/litre solu-

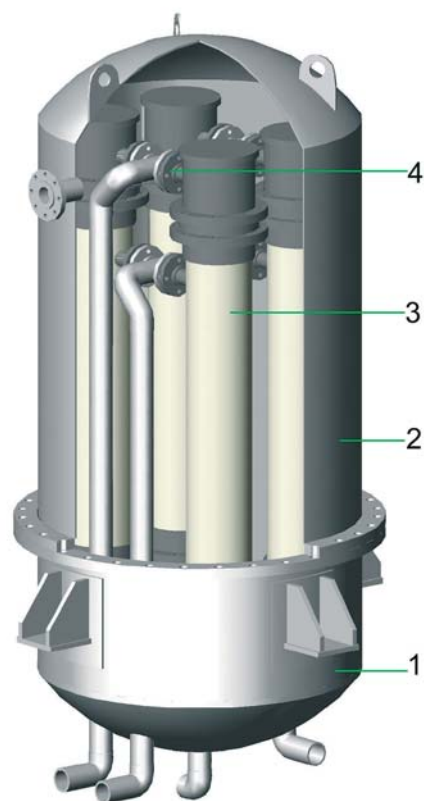


Рис. 4. Непроточный ультрафильтрационный аппарат с четырьмя волоконными модулями: 1, 2 – нижняя и верхняя части корпуса, 3 – мембранный модуль, 4 – входной коллектор
Fig. 4. Dead-end ultrafiltration unit featuring four fibre modules: 1, 2 – lower and upper body sections, 3 – membrane module, 4 – inlet manifold

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕПРОТОЧНОЙ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ И МИКРОФИЛЬТРАЦИИ
COMPARISON BETWEEN METHODS OF DEAD-END ULTRAFILTRATION AND MICROFILTRATION

Параметр <i>Parameter</i>	Непроточная ультрафильтрация с полимерными волоконными элементами <i>Dead-end ultrafiltration using polymer fibre elements</i>	Микрофильтрация с керамическими трубчатыми многоканальными элементами <i>Microfiltration using tubular ceramic multi-channel elements</i>
Удельная производительность, л/м ² ·ч <i>Specific capacity, litre/m²·hour</i>	200	650
Рабочее давление, МПа <i>Operating pressure, MPa</i>	0,18	0,15
Средний размер пор, мкм <i>Average pore size, µm</i>	0,02	0,05
Материал мембран <i>Membrane material</i>	полимер <i>polymer</i>	керамика <i>ceramics</i>
Удельная фильтрующая поверхность, м ² /м ³ / <i>Specific filtration surface, m²/m³</i>	640	50
Рабочий диапазон температур, °С <i>Range of operating temperatures, °C</i>	0-40	0-100
Радиационная стойкость при γ-облучении, Гр <i>Resistance to γ-radiation, Gr</i>	≤10 ⁵	>10 ⁷
Максимально достижимое содержание измельченной ржавчины в концентрате без снижения производительности мембранного аппарата, г/л <i>Maximum achievable content of ground rust in the concentrate without reduction of membrane unit capacity, g/litre</i>	≤5	35-40
Удельные энергозатраты на прокачку раствора над поверхностью мембраны при линейной скорости 3,5 м/с, отнесенные к 1 м ³ пермеата, МДж/м ³ <i>Specific energy consumption for pumping the solution above membrane surface with linear speed 3.5 m/sec, per 1 m³ of permeate, MJ/m³</i>	≤0,001	190,4
Удельные энергозатраты на прокачку раствора через мембрану, отнесенные к 1 м ³ пермеата, МДж/м ³ <i>Specific energy consumption for pumping the solution through the membrane, per 1 m³ of permeate, MJ/m³</i>	0,18	0,15
Долговечность <i>Durability</i>	до 5 лет <i>up to 5 years</i>	более 5 лет <i>over 5 years</i>
Стоимость фильтрующих элементов <i>Cost of filtering elements</i>	низкая <i>low</i>	высокая <i>high</i>

работки среднеактивных отходов должно соответствовать классу безопасности ЗН, а не общепромышленному.

При разработке конструкции мембранного аппарата (рис. 4) учитывались нормативные требования атомной энергетики, прочность всех элементов рассчитывалась по нормативам при статических нагрузках и сейсмических воздействиях.

Кроме того, в конструкции непроточной ультрафильтрационной установки предусмотрены следующие технические решения:

tion of citric acid helped fully restore the production capacity of the ultrafiltration module after approximately 1 hour.

The total sludge capacity of the module may be estimated to be 0.139 litre. Assuming that the water content of the original iron hydroxide sludge is 90%, then the fibres cannot accommodate more than 14 g equivalent of dry iron hydroxide. Apparently, for all practical means, filling more than 10% of the fibres volume with sludge creates considerable problems with their washing.

The outcome of the first stage of research was experimental definition of the optimum mode of operation for the ultrafiltration module. With rust concentration in the simulated solution within 56-77.2 mg/litre, the module worked stably with the following filtration sequence used: feed-in from one side of the module – feed-in from the other side of the module – back-flushing – back-flushing from the other side of the module. The average specific capacity of the module was 86 litre/m²·hour with inlet temperature of the solution +24-30°C. Operating pressure of the solution at inlet to the module was 0.18 MPa. The amount of secondary waste with rust concentration approximately 1 g/litre was up to 8% of the volume of the original treated solution.

During the second stage of research, a single-channel module was used with diameter of active channel 1.5 mm. The tests were carried out using a simulated solution containing a mix of ground rust particles 150 mg/litre and graphite 10 mg/litre.

The filtration sequence was as follows: feed-in from one side of the module – back-flushing – feed-in from the other side of the module – back-flushing. Pressure at inlet to the module was 0.16-0.22 MPa. The tests ran continually for 27 days (5-6 hours of operation followed by 18-19 hours down time). The capacity of the module remained constant throughout the testing period at 78±3 litres/hour (with specific capacity 195 litre/m²·hour).

Total solution filtration time was recorded to be 46 hours, with the total of 3.6 m³ of suspension filtered, 120 litres of concentrate generated with solid residue concentration of 4.7 g/litre. The amount of secondary waste was 3.4% of the volume of treated water.

ULTRAFILTRATION UNIT DESIGN

On the basis of the tests that were performed, GIDROTEKH Ltd. developed the technical design of an ultrafiltration unit for removal of suspended particles from water from the pool where the AMB spent fuel will

- размещение оборудования и трубопроводов с радиоактивными средами в закрытых, дистанционно обслуживаемых боксах, обеспечивающих радиационную защиту персонала;

- исполнение оборудования в боксах из нержавеющей стали, находящихся под небольшим разряжением воздуха, для предотвращения выхода радиоактивных отходов за пределы защитных корпусов в случае разгерметизации оборудования;

- оснащение необходимыми контрольно-измерительными приборами, включая аварийную сигнализацию и блокировку при нарушениях технологического процесса;

- дистанционное управление оборудованием и арматурой без посещения персоналом закрытых помещений.

УЛЬТРАФИЛЬРАЦИЯ И МИКРОФИЛЬРАЦИЯ

Метод непроточной ультрафильтрации, по сути, близок процессу микрофильтрации, при котором используются многоканальные трубчатые керамические элементы [3]. Испытания микрофильтрационного аппарата (общая площадь фильтрации – около 1,15 м²) на модельных растворах с концентрацией измельченной ржавчины до 9,6 г/л были проведены на ГУП МосНПО «Радон» в 2010 году. Основные результаты сравнения (см. таблицу) показывают, что каждый из методов имеет свои характерные недостатки и преимущества.

Представляется, что сочетание этих двух методов позволит оптимальным путем достигать желаемого результата – минимального объема вторичных отходов, высокого качества очистки воды при низкой стоимости установки. Рекомендуется на первой стадии очистки радиоактивных вод, поступающих из бассейна разделки ОЯТ, использовать относительно дешевую технологию непроточной ультрафильтрации, а дорогостоящий процесс микрофильтрации применять только для дополнительного доконцентрирования. При этом можно использовать небольшую микрофильтрационную установку, вклад которой в общую стоимость комплекса будет небольшим. Предложенный вариант также целесообразен при концентрировании среднеактивных отходов, поскольку радиационная стойкость керамических мембран намного выше, чем у полимеров.

Литература / References:

1. Кудрявцев Е.Г. Обращение с ОЯТ АМБ / Е.Г. Кудрявцев, В.П. Смирнов // *Безопасность окружающей среды*. – 2010. – № 1. – С. 66–68.
2. *Селективные и термостойкие неорганические сорбенты марки «Термоксид» для атомной энергетики и переработки ядерных отходов*. – ЗАО Производственно-научная фирма «Термоксид». – 2002.
3. Buckley L., Bushart S., Efremkov V., Karlin Y., Kohout R., Pabby A., Tapsell G. *Application of Membrane Technologies for Liquid Radioactive Waste Processing*. IAEA-TRS No.431. 2004. 145 p.
4. Кестинг Р.Е. *Синтетические полимерные мембраны*. – М.: Химия. – 1991. – 336 с.
5. Лейси Р. *Технологические процессы с применением мембран* / Р. Лейси, С. Лоэб. – М.: Мир. – 1976. – 370 с.
6. Первов А.Г. *Современные высокоэффективные технологии очистки питьевой и технической воды с применением мембран: обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация*. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. – 2009. – 232 с.
7. *Technical specification pilot unit d5000. Subject to modifications and errors*. 2006 inge AG (Release 06/02). 36 p.
8. Стабников В.Н. *Процессы и аппараты пищевых производств* / В.Н. Стабников, В.И. Баранцев. – М.: Пищевая промышленность. – 1974.

be cut at Beloyarsk NPP and designed the membrane unit for it.

The design effort took into account the practical experience obtained during the testing of the dead-end ultrafiltration unit with fibre elements (fig. 3) using water from the Techa ponds cascade.

The key difference in the design was associated with the fact that the Techa ponds water is classified as low-level liquid radioactive waste, whereas the water from the spent fuel cutting pool can clearly be regarded as intermediate-level waste. In addition, the design requirements applicable to equipment to be used on a nuclear power station (even one that has been shut down) are always stricter, and the safety classification of equipment for intermediate radwaste processing is to be 3N nuclear class, rather than general industrial safety.

The design of the membrane unit (fig. 4) took into account the requirements of nuclear regulations, with all components designed to withstand the appropriate static loads and seismic impacts.

In addition, the design of the dead-end ultrafiltration plant features the following technical solutions:

- equipment and pipelines that contain radioactive materials are placed in enclosed remotely-maintained boxes that provide radiation shielding of personnel;

- equipment is designed to be contained inside boxes of stainless steel, with inner air pressure slightly below atmospheric, in order to prevent escape of radioactive waste to outside the protective encasements in case of equipment de-pressurisation;

- provision of measuring and monitoring instrumentation as necessary, including emergency alarms and interlocks triggered by process irregularities;

- remote control of equipment and valves without the need for personnel to enter locked rooms.

ULTRAFILTRATION AND MICROFILTRATION

The dead-end ultrafiltration method, in its essence, is close to microfiltration, whereby multi-channel tubular ceramic filtering elements are used [3]. Tests of a microfiltration unit (total filtration area approximately 1.15 m²) were performed by SUE SIA Radon Moscow in 2010, using simulated solutions with ground rust concentration up to 9.6 g/litre. Key results of comparison (see table) demonstrate that both methods have their own characteristic advantages and disadvantages.

It would appear that a combination of the two methods would present the optimum solution for achieving the desired objectives: minimising the amount of secondary waste, and assurance of a high standard of water treatment quality at the same time with a low plant costs. The recommendation is therefore that for the first stage of treatment of radioactive water from the fuel cutting pool the relatively cheap dead-end ultrafiltration technology should be used, and the expensive microfiltration process should be saved only for additional super-concentration. A smaller-scale microfiltration unit could be sufficient, with modest contribution towards the overall cost of the water treatment plant. The proposed option may also be sensible for concentration of intermediate-level waste, as radiation resistance of ceramic membranes is far superior to that of polymers.