

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ СТРАНЫ

УДК 621.8.035 : 621.039

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ЯОП-УСТАНОВКИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

А.В. Карелин, Р.В. Широков  
(Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН)

И.Н. Хиблин  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Л.А. Амелин  
(ОАО «НИИЭМ»)

Приведена примерная оценка энергетических характеристик установки по утилизации радиоактивных отходов на основе ядерно-оптических преобразователей (ЯОП-установки), теплофизических и гидродинамических ограничений на ее работу. Показано, что в рассматриваемой конфигурации полная электрическая мощность установки составляет 1 МВт, оптимальная скорость прокачки аргон-азотной смеси через активную зону составляет 3 м/с, гамма-активность радиоактивных отходов не должна превышать  $10^{17} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , а удельная мощность тепловыделения в бочках с радиоактивными отходами не должна превышать  $0,1 \text{ Вт/см}^3$ .

**Ключевые слова:** ядерно-оптический преобразователь, цезий-137, радиоактивные отходы, утилизация, теплоноситель, расход газа, коэффициент сопротивления, фотоэлектрический преобразователь, халькопириты, гамма-излучение, перепад температур, скорость прокачки, тепловыделение.

**Введение.** Нынешний мировой финансовый кризис не остановит экспоненциальный рост мирового энергопотребления в течение ближайшего столетия. Тот факт, что зависимость энергопотребления от времени в полулогарифмических координатах представляет собой почти прямую линию (рис. 1), означает, что эта зависимость экспоненциальная [1].

Ядерная энергетика должна стать главным энергоисточником XXI века, не став таковым по ряду причин в конце XX и, прежде всего, из-за наличия достаточного количества нефти и природного газа на мировом рынке по умеренным ценам, аварий на атомных станциях, вызвавших недоверие к ним общества, отсутствия убедительных концепций ядерной и радиационной безопасности. В то же время, согласно Энергетической стратегии России, увеличение потребности в электроэнергии целесообразно покрывать за счет роста ее выработки на АЭС в основном в Европейской части страны.

Тем не менее, не следует забывать и об отрицательных сторонах развития ядерной энергетики. Одной из отрицательных сторон ядерной энергетики являются радиоактивные отходы. Твердые радиоактивные отходы захоранивают в контейнерах из нержавеющей стали в подземных выработках, соляных пластах, на дне океанов.

Радиация является жестким излучением, которое можно использовать как источник энергии в ядерно-оптических преобразователях (ЯОП) с дальнейшей конверсией оптического излучения в электроэнергию с помощью фотоэлектрических преобразователей. Электричество может выраба-

тываться в постоянном режиме в течение многих лет практически без смены источника излучения, если уровень остаточной радиоактивности и период полураспада достаточно высоки [2 – 4].

Целью данной работы является примерная оценка энергетических характеристик установки по утилизации радиоактивных отходов на основе ЯОП (ЯОП-установки), теплофизических и гидродинамических ограничений на ее работу, выработка требований к параметрам ЯОП и радиоактивных отходов.

**Энергетические характеристики ЯОП-установки.** Активная среда в ЯОП, обычно являющаяся специально подобранной по составу и давлению газовой смесью, возбуждается жестким излучением. Жестким принято называть такое корпускулярное или электромагнитное излучение, которое ионизует и возбуждает газ, но слабо взаимодействует непосредственно с электронами образовавшейся плазмы.

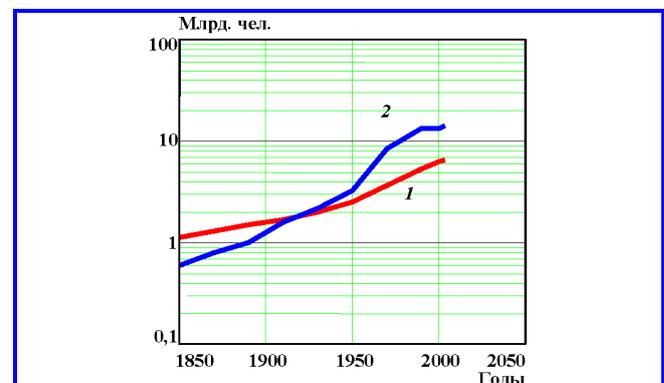


Рис. 1. Рост населения  $N$  (1) и энергопотребления  $Q$  (2) Земли за последние 160 лет

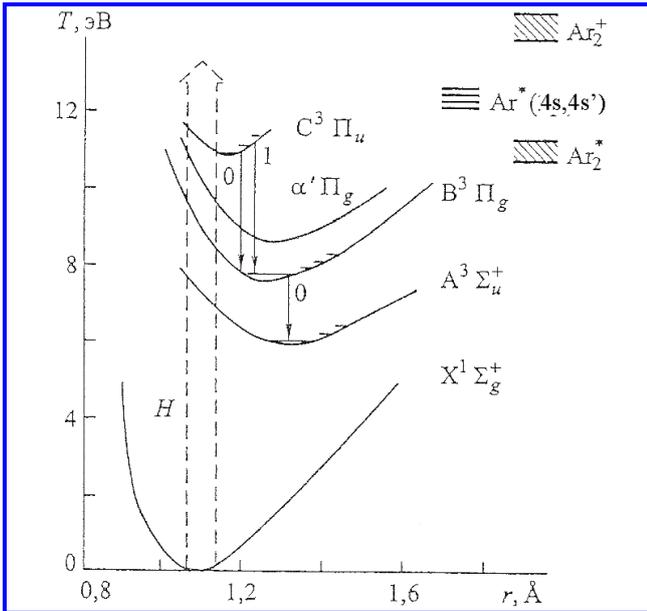


Рис. 2. Потенциальные кривые молекулы азота и некоторых уровней аргона

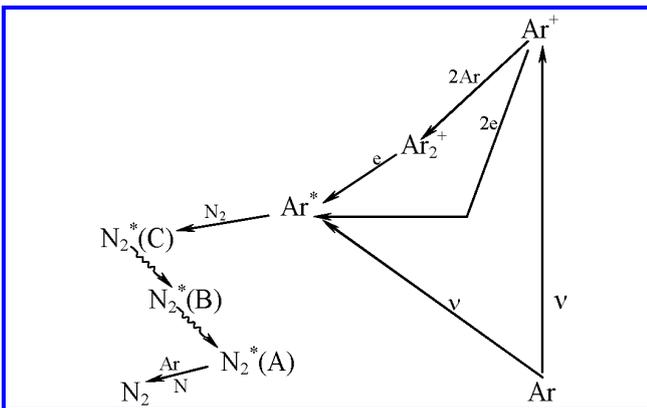


Рис. 3. Схема плазмохимических процессов в смеси Ar-N₂

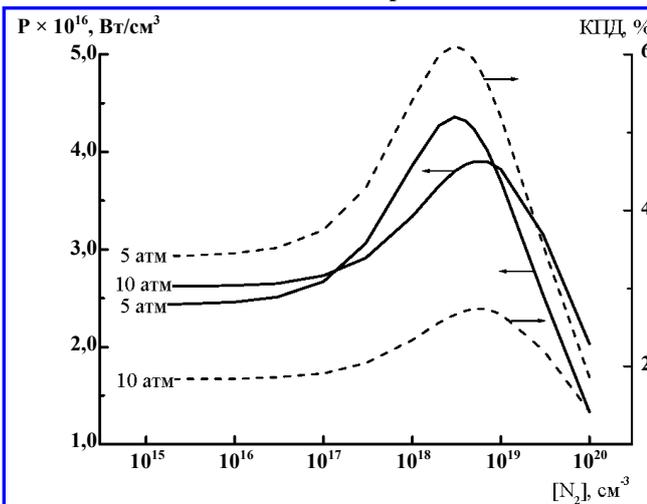


Рис. 4. Зависимости удельной мощности  $P$  излучения (сплошные линии) и КПД (штриховые) смеси Ar – N₂ от концентрации азота  $[N_2]$  для давлений аргона 5 и 10 атм при частоте ионизации  $\nu = 10^{-17} \text{ с}^{-1}$

Роль такого излучения могут играть электронные и ионные пучки, продукты ядерных реакций, потоки коротковолновых фотонов (вплоть до  $\gamma$ -квантов, получаемых в ядерном взрыве). «Жесткие частицы» (электроны, ионы, фотоны) ионизируют атомы и молекулы газовой смеси, создавая неравновесную плазму с повышенной степенью ионизации.

При возбуждении жестким ионизатором газов последовательность процессов следующая: быстрая заряженная частица или коротковолновый фотон ионизируют газ; образовавшиеся низкоэнергетичные электроны плазмы формируют в столкновениях максвелловское распределение и рекомбинируют. Такая плазма называется рекомбинационно-неравновесной или переохлажденной [5].

Основным источником проникающей радиации отработанного топлива ядерных реакторов является  $\gamma$ -излучение  $\text{Cs}^{137}$  (период полураспада 30 лет) с энергией  $E_\gamma = 662 \text{ кэВ}$ . В этом случае задача создания источника энергии на основе ЯОП сводится к поиску радиолитически и термически устойчивой, а также химически инертной среды с достаточно высоким КПД преобразования ядерной энергии в оптическое излучение в удобном для кремниевых и халькопиритных фотоэлектрических преобразователей диапазоне спектра. В качестве активной среды мы предлагаем использовать смесь Ar – N₂, излучающую преимущественно в диапазонах длин волн 350 – 410 и 750 – 1050 нм на переходах C→B и B→A молекулы азота N₂ соответственно (рис. 2) [2 – 4].

Упрощенная схема плазмохимических процессов в смеси Ar-N₂ представлена на рис. 3. Под действием ионизирующего излучения и вторичных электронов образуются ионы и возбужденные атомы аргона. Возбужденные атомы аргона образуются также в результате тройной ударно-излучательной рекомбинации атомарных и диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов аргона. Последние образуются в результате трехчастичной конверсии атомарных ионов в молекулярные. Возбужденные атомы аргона вследствие радиационных переходов и неупругих столкновений заселяют метастабильные и резонансно-связанные с основным 4s и 4s' состояния. Если давление аргона порядка атмосферного, резонансно-связанные состояния сильно зареабсорбированы и фактически являются метастабильными. Далее энергия от возбужденных атомов аргона в бинарных столкновительных реакциях передается молекулам азота в состоянии N₂\*(C) с последующим излучением на переходах C→B и B→A.

Излучательные характеристики смеси Ar – N<sub>2</sub> были получены с использованием разработанных ранее кинетических моделей и комплекса программ «ПЛАЗЕР». Результаты численного моделирования удельной мощности излучения, КПД и оптимизации смеси Ar – N<sub>2</sub> представлены на рис. 4 – 7. Удельная мощность излучения и КПД смеси существенно зависят от парциальной концентрации азота (рис. 4). При этом оптимальное содержание азота и КПД почти не зависят от частоты ионизации в рассматриваемом диапазоне радиоактивности при фиксированном полном давлении смеси (рис. 5). Кроме того, КПД и удельная мощность излучения достаточно слабо зависят от давления смеси в достаточно широком диапазоне изменения (рис. 6, 7).

Принципиальная схема установки утилизации радиоактивных отходов на основе ЯОП-установки приведена на рис. 8. Для оценки выходных характеристик предлагаемого устройства будем рассматривать сборку, состоящую из двухсот стандартных контейнеров диаметром  $d = 0,5$  м и высотой  $h = 1$  м, складированных в три этажа. Давление аргон-азотной смеси  $p$  примем равным 5 атм (соотношение концентраций  $[Ar] : [N_2] = 45 : 1$ ). Характерная длина пробега гамма-квантов по отношению к фотоионизации с учетом ослабления в бочках в этих условиях составляет 80 м. Таким образом, характерные размеры одной сборки – радиус  $R = 40$  м, высота  $H = 3$  м. При этом обеспечивается высокая однородность энерговыделения в газе (свыше 95%). Далее будем полагать, что контейнеры заполнены отработанным оксидным топливом из зоны большого обогащения с высокой глубиной выгорания (до 28%) реакторов на быстрых нейтронах после переработки, обладающим гамма-активностью со скоростью  $f = 8,6 \cdot 10^{16}$  распадов/(м<sup>3</sup>·с), что соответствует частоте ионизации газовой смеси в принятой конфигурации сборки  $\nu = 1 \cdot 10^{-5}$  с<sup>-1</sup> (или удельной мощности объемного тепловыделения в газе  $q_v = 5,5$  мВт/см<sup>3</sup>). В этих условиях полный расчетный КПД смеси при облучении составляет  $\eta = 6\%$  с примерно равным распределением энергии между рассматриваемыми диапазонами длин волн. Принимая КПД современного двухслойного фотоэлектрического преобразователя примерно 20%, получим, что ожидаемая удельная электрическая мощность энергосъема с отработанного топлива составляет 1 Вт/кг, а полная постоянная электрическая мощность одной сборки радиусом 40 м и высотой 3 м из 200 контейнеров диаметром 0,5 м  $Q_{el} = 1$  МВт.

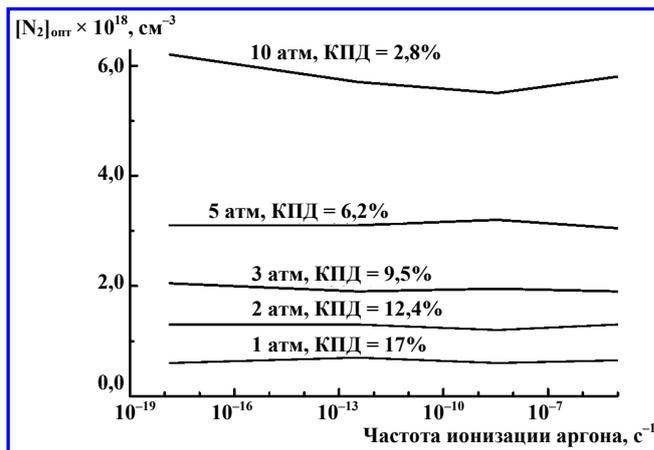


Рис. 5. Зависимости оптимальной концентрации азота от частоты ионизации для различных полных давлений смеси Ar – N<sub>2</sub>

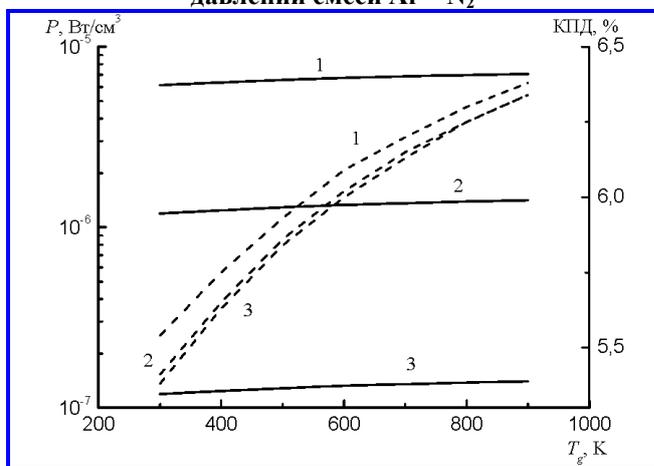


Рис. 6. Зависимости удельной мощности излучения  $P$  (сплошные линии) и КПД (пунктир) от температуры смеси Ar – N<sub>2</sub> (45:1) (давление смеси  $p = 5,5$  атм) для различных частот ионизации  $\nu$  ( $1 - 10^{-8}$  с<sup>-1</sup>,  $2 - 5 \cdot 10^{-9}$  с<sup>-1</sup> и  $3 - 10^{-9}$  с<sup>-1</sup>)

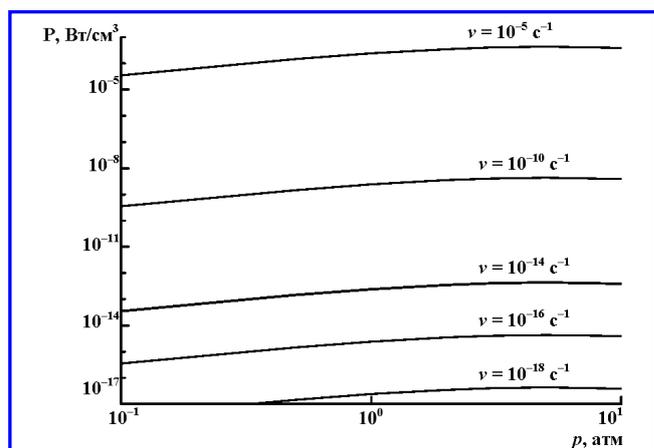


Рис. 7. Зависимости удельной мощности излучения  $P$  от давления смеси Ar – N<sub>2</sub> для различных частот ионизации. Концентрация азота в каждой расчетной точке задавалась оптимальной по КПД

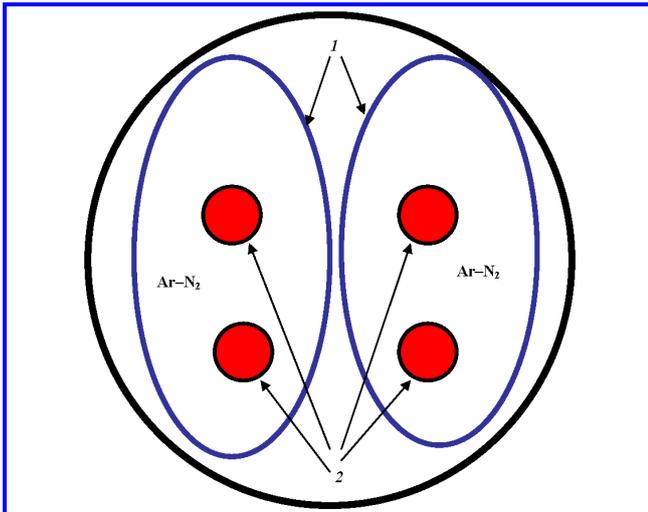


Рис. 8. Принципиальная схема ядерно-оптической установки для утилизации радиоактивных отходов: 1 – фотоэлектрические преобразователи; 2 – бочки с радиоактивными отходами

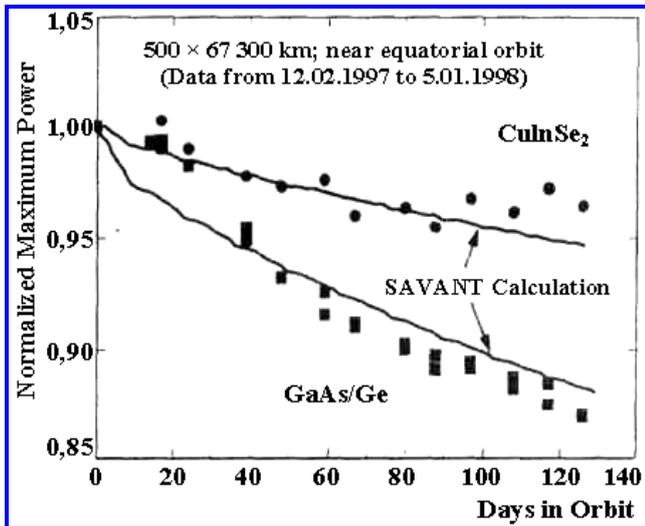


Рис. 9. Сравнение работы бортовых солнечных батарей из GaAs и CIS ячеек на борту орбитальной миссии Экватор

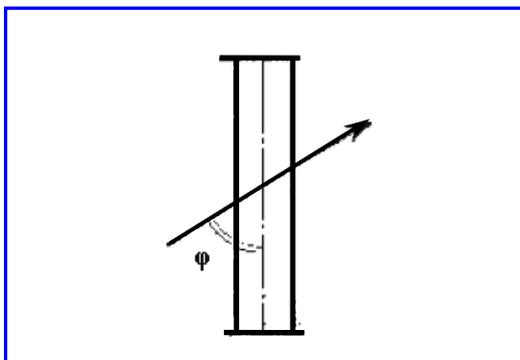


Рис. 10. Угол атаки охлаждаемой трубы потоком теплоносителя

Существенное значение с точки зрения экономической целесообразности имеет вопрос радиационной стойкости фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), как важного компонента проектируемой установки. Установлено, что среди всех рассмотренных ФЭП (Si, Ge, AlGaAs/GaAs, InP, InGaAs, InGaP, InGaAsP, CuInSe<sub>2</sub>, Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>) наименее подвержены воздействию радиации по своим вольт-амперным характеристикам фотоэлектрические преобразователи на основе халькопиритов Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIS или CIGS). Эти ФЭП имеют наилучшие характеристики после облучения электронами, протонами и гамма-квантами как на Земле, так и в космосе (рис. 9) [6]. К сожалению, технологии создания ФЭП на основе халькопиритов в РФ пока не развиты.

**Теплофизические ограничения ЯОП-установки.**

Теплофизические ограничения обусловлены тепловыделением в результате радиоактивного распада в бочках с отходами и в газовой среде, в результате чего возможно плавление и коррозия бочек и отходов. Газовая среда при этом является также теплоносителем, используемым для охлаждения бочек.

Будем полагать, что бочки выполнены из реакторной стали 12X18H9T. В растворах разбавленной серной кислоты и хлоридных солей щелочных и щелочно-земельных металлов хромникелевые стали более устойчивы, чем хромистые, но подвергаются точечной коррозии и коррозионному растрескиванию.

Сталь 15X5M (5 – 6 % хрома) выдерживает нагрев до 600°C, а сталь 08X13 (13 – 14 % хрома) до 850°C, 12X17 и X25, соответственно, 850 – 900 °C и 1100 – 1200 °C. Однако с ростом концентрации хрома ухудшаются технологические свойства сталей, в частности ее обрабатываемость. Для повышения устойчивости сталей в средах, содержащих хлор-ионы, и растворах серной кислоты хромникелевые стали дополнительно легируют молибденом (X17H13M2T, X21H6M2T) и медью (X23H23M3Д, X23H28M3ДЗТ). Так как молибден способствует ферритообразованию, в сталях этого вида наряду с введением молибдена повышается концентрация никеля, что способствует сохранению однородной аустенитной структуры. В этой связи такие стали значительно дороже хромникелевых.

Для дальнейших оценок будем полагать, что удельная мощность тепловыделения в бочках меняется в диапазоне  $q = 10^{-6} \dots 1$  Вт/см<sup>3</sup>, толщина стенки бочек  $\delta = 0,5$  см, а скорость прокачки газа  $w = 10^{-3} \dots 10$  м/с. Размеры активной зоны (АЗ) и количество бочек указаны выше.

Если энерговыделение в активной зоне равномерно, то температура теплоносителя и бочек растет линейно по длине канала, причем одина-

ково во всех каналах, и достигает максимума на выходе из активной зоны. Это сечение является самым теплонапряженным, для него и будем проводить оценки поля температуры.

Найдем характерные температуры в канале с идеальным тепловым контактом между стенкой бочки и её содержимым. Температура наружной поверхности бочки отличается от средней (по сечению канала) температуры газа на величину

$$\Delta t_3 = qd/4\alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Величина  $\alpha$  в газе, в котором есть объемное тепловыделение  $q_v$ , определяется по формуле [7]

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \left( 1 + 0,0834 \frac{q_v}{q} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Величина  $\alpha_0$  определяется по формуле

$$\alpha_0 = (\lambda(t)Nu)/d, \quad (3)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $\lambda(t)$  – теплопроводность газа, которая зависит от температуры  $t$  и допускает линейную аппроксимацию:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{200}(t - 400) + \lambda_1. \quad (4)$$

Здесь  $\lambda_1 = 30 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К) и  $\lambda_2 = 40 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К) – теплопроводность аргона при температурах  $t = 400^\circ\text{C}$  и  $t = 600^\circ\text{C}$ , соответственно.

При турбулентном течении газа и шахматном расположении труб критерий Нуссельта определяется по формуле

$$Nu = 0,4\epsilon_\phi Re^{0,6} Pr^{0,36}, \quad (5)$$

где  $Re = \rho wd/\mu$  – критерий Рейнольдса;  $Pr = \mu/\rho a$  – критерий Прандтля;  $\mu = 2,2 \cdot 10^{-5}$  Па·с – коэффициент динамической вязкости аргона;  $\rho = 8,05$  кг/м<sup>3</sup> – плотность аргона при давлении  $p = 5$  атм и  $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $a = \lambda/\rho c_p$  – коэффициент температуропроводности;  $\epsilon_\phi$  – коэффициент, учитывающий влияние угла атаки  $\phi$  (таблица, рис. 10).

Из таблицы следует, что наиболее эффективно охлаждение идет при поперечной прокачке газа через активную зону установки.

**Коэффициент угла атаки**

$\phi$	90	80	70	60	50	40	30	20	10
$\epsilon_\phi$	1	1	0,98	0,94	0,88	0,78	0,67	0,52	0,42

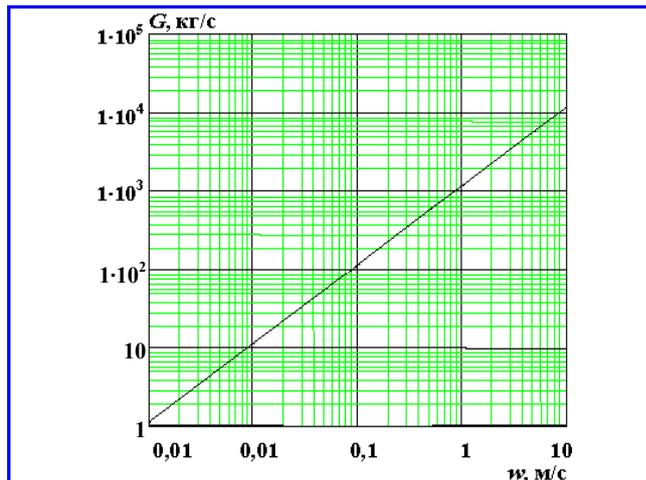


Рис. 11. Зависимость расхода  $G$  газовой смеси  $\text{Ar} - \text{N}_2$  ( $p = 5$  атм) от скорости прокачки  $w$  через активный объем ЯОП

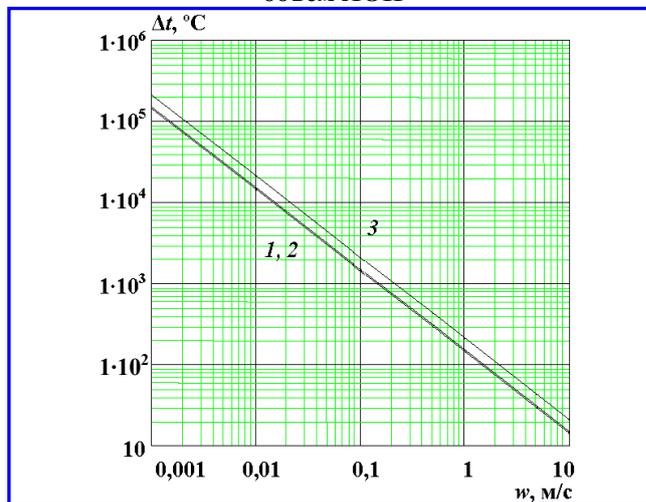


Рис. 12. Зависимость нагрева  $\Delta t$  смеси  $\text{Ar} - \text{N}_2$  ( $p = 5$  атм) от скорости прокачки  $w$  через активный объем ЯОП при удельной мощности тепловыделения в бочках  $q, \text{ Вт}/\text{см}^3$ : 1 – 0,001; 2 – 0,1 и 3 – 1

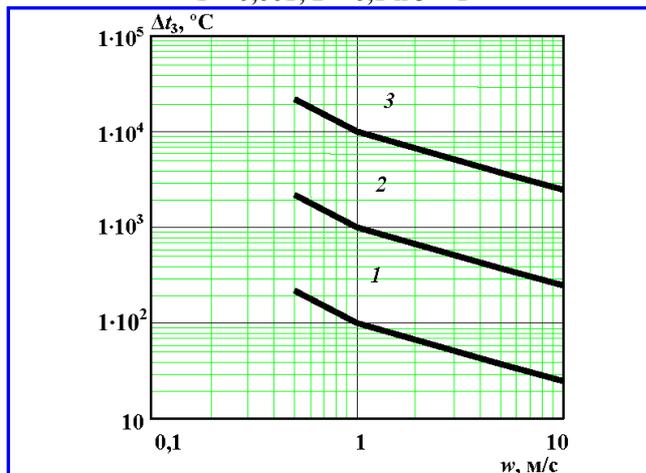


Рис. 13. Зависимость перепада температур от стенки к газу ( $p = 5$  атм)  $\Delta t_3$  от скорости прокачки  $w$  через активный объем ЯОП при удельной мощности тепловыделения в бочках  $q, \text{ Вт}/\text{см}^3$ : 1 – 0,001; 2 – 0,1 и 3 – 1

Нагрев теплоносителя при прокатке через АЗ оценивается по формуле

$$\Delta T = \frac{q\pi d^2 h n + q_v \pi H \left( D^2 - d^2 \frac{n}{3} \right)}{4Gc_p}, \quad (6)$$

где  $D = 2R$  – диаметр АЗ;  $G$  – расход газа, кг/с.

Расход газа оценивается по формуле

$$G = \rho w S = \rho w H \left[ D - \left( \frac{n}{3} d \right) \right]. \quad (7)$$

Расход газа, его нагрев и перепад температур между наружной стороной стенки и газом в зависимости от скорости прокатки через АЗ при различных плотностях мощности тепловыделения в бочках приведены на рис. 11 – 13. Из рис. 12 следует, что при плотности мощности тепловыделения в бочке менее  $0,1 \text{ Вт/см}^3$  основной вклад в нагрев теплоносителя дает удельное тепловыделение в самом газе. Кроме того, видно, что скорость прокатки газа при заданной активности цезия-137 должна быть не менее  $w_{\min} = 1 \text{ м/с}$ , а плотность мощности тепловыделения в бочках не должна превышать  $q_{\max} = 0,1 \text{ Вт/см}^3$ . Поэтому в дальнейших расчетах в качестве базовой использовалась плотность мощности тепловыделения в бочках равная  $q_{\max}$ .

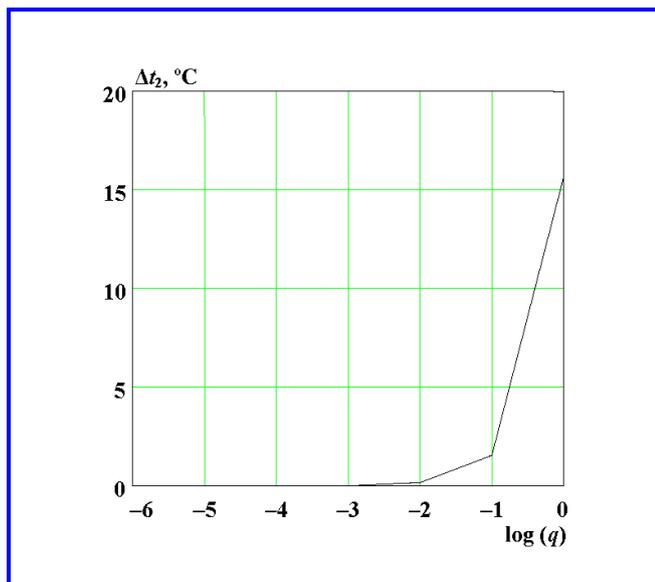


Рис. 14. Зависимость перепада температур  $\Delta t_2$  внутри стенки бочки от удельной мощности тепловыделения  $q$  в бочках

Перепад температур в стенке бочки оценивается по формуле

$$\Delta t_2 = \frac{q d^2}{8\lambda_c} \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (8)$$

где  $\lambda_c = 20 \text{ Вт/(м·К)}$  – теплопроводность стенки бочки;  $d_2 = d$  – внешний диаметр бочки;  $d_1 = (d - \delta)$  – внутренний диаметр бочки.

Зависимость перепада температур в стенке бочки от плотности мощности тепловыделения радиоактивных отходов в бочке приведена на рис. 14.

Перепад температур между осью бочки и её внутренней стенкой при условии идеального контакта оценивается по формуле

$$\Delta t_1 = \frac{q(d - \delta)^2}{16\lambda_t}, \quad (9)$$

где  $\lambda_t$  – теплопроводность радиоактивных отходов (для оценки полагалась равной  $20 \text{ Вт/(м·К)}$ ), в соответствии с примерным значением теплопроводности различных видов высокотемпературного ядерного топлива [8]).

Зависимость перепада температур между осью бочки и её внутренней стенкой от плотности мощности тепловыделения радиоактивных отходов в бочке приведена на рис. 15.

Результирующий перепад температур между осью бочек и начальной температурой газа в наиболее теплонпряженном сечении  $\Delta t$  приведен на рис. 16. Видно, что во избежание расплавления отходов и разрушения бочек при плотности мощности тепловыделения радиоактивных отходов  $0,1 \text{ Вт/см}^3$  скорость прокатки должна быть не менее  $2 - 3 \text{ м/с}$ .

**Гидродинамические ограничения ЯОП-установки.** Для обеспечения работы установки в стационарном режиме необходимо обеспечить прокатку газа по замкнутому контуру, включающему, кроме активной зоны, холодильник, трубы и компрессор. Вследствие трения движущегося газа о стенки каналов, повороты в контуре, выхода из трубы в больший объем, входа из большего объема в трубу и его ускорения при нагревании в активной зоне, давление и концентрация атомов газа уменьшается в направлении течения газа:

$$\Delta p = \Delta p_{тр} + \Delta p_{уск} + \Delta p_{кон}; \quad (10)$$

$$\Delta p_{тр} = \xi_t \frac{H_0 \rho_0 w_0^2}{d_0^2}; \quad (11)$$

$$\Delta p_{кон} = \sum_i \xi_i \frac{\rho_0 w_0^2}{2}; \quad (12)$$

$$\Delta p_{уск} = (\rho w)^2 \left[ \frac{1}{\rho_D} - \frac{1}{\rho_1} \right], \quad (13)$$

где  $\Delta p_{кон}$  – падение давления в контуре за пределами АЗ;  $\xi_i$  – местные коэффициенты гидравлического сопротивления при движении по замкнутому контуру;  $\xi_t$  – коэффициент гидравлического сопротивления в результате трения;  $\rho$  – плотность газа (индексы  $D$  и  $1$  – означают, что плотность берется на выходе и входе канала АЗ).

Индекс 0 означает параметры потока за пределами АЗ. Получаем, что перепад давления квадратично зависит от полного массового расхода газа  $G$ , который в свою очередь связан с подогревом  $\Delta T$  в активной зоне и тепловой мощностью  $Q$  установки уравнением теплового баланса:

$$G = \frac{Q}{c_p \Delta T}, \quad (14)$$

где  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении. Мощность на прокачку через АЗ определяется как

$$W_{пр} = \sum_i \frac{\Delta p_i G}{\rho_i}, \quad (15)$$

где индекс  $i$  означает суммирование по различным участкам контура.

В случае выхода из прямого участка трубы постоянного сечения в большой объем полные потери сводятся только к потерям динамического давления на выходе. При равномерном распределении скоростей общий коэффициент сопротивления равен единице, в остальных случаях всегда больше единицы [9].

В случае входа потока из большого объема в прямую трубу минимальное значение коэффициента сопротивления  $\xi$  может быть достигнуто 0,5 при заделке трубы заподлицо со стенкой объема.

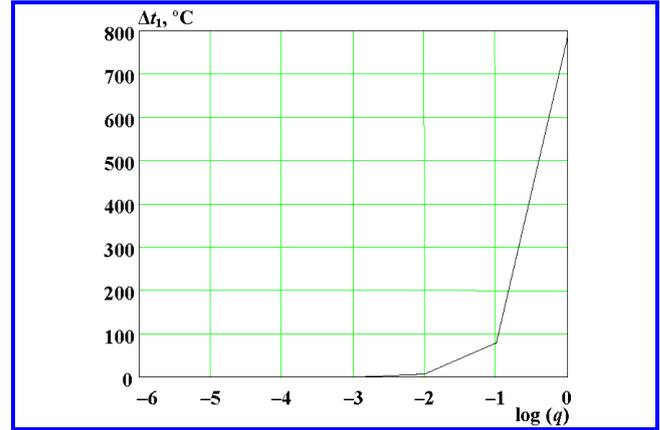


Рис. 15. Зависимость перепада температур  $\Delta t_1$  от центра бочки к ее внутренней стенке от удельной мощности тепловыделения  $q$  в бочках

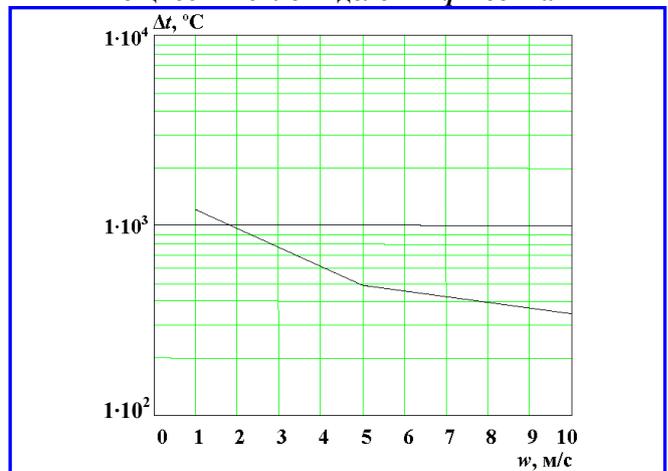


Рис. 16. Перепад температур  $\Delta t$  между центром бочки и газовой смесью  $Ar - N_2$  в зависимости от скорости прокачки  $w$  газа ( $p = 5$  атм) через активный объем ЯОП при удельной мощности тепловыделения  $q = 0,1$  Вт/см<sup>3</sup> в бочках

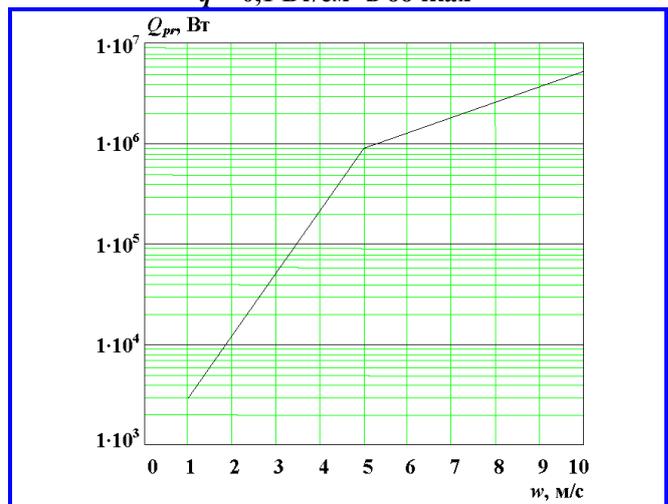


Рис. 17. Зависимость мощности  $Q_{пр}$  требуемой для прокачки газовой смеси через активный объем ЯОП, от скорости прокачки  $w$  газа ( $p = 5$  атм) при удельной мощности тепловыделения  $q = 0,1$  Вт/см<sup>3</sup> в бочках

Существенно уменьшить коэффициенты гидравлического сопротивления можно в том случае, если сделать вход и выход в виде диффузоров с большим выходным сечением и закругленными краями. В этом случае коэффициент сопротивления  $\xi$  можно уменьшить до 0,25 – 0,35.

В предполагаемом замкнутом контуре ожидается наличие четырех прямоугольных колен. Основная часть потерь в изогнутых трубах вызывается вихреобразованием у внутренней стенки, которое вместе со вторичными потоками определяет в основном и характер распределения скоростей за поворотом. При прочих равных условиях изогнутая труба создает наибольшее сопротивление в том случае, когда кромка изгиба на внутренней стенке острая; отрыв потока от этой стенки происходит наиболее интенсивно. Сопротивление прямых колен может быть существенно уменьшено путем установки на внутренней кромке круговых обтекателей. При оптимальном обтекателе коэффициент сопротивления  $\xi$  прямого колена снижается до 0,55. Однако наилучшим способом существенно уменьшить гидравлическое сопротивление при движении по изогнутым траекториям можно сделав контур в виде кольца. В этом случае коэффициент сопротивления  $\xi$  можно уменьшить до 0,1.

Коэффициент гидравлического трения для гладких труб оценивается по формуле Блаузиуса

$$\xi_t = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (16)$$

Результаты предварительных расчетов мощности  $Q_{pr}$ , требуемой для прокачки теплоносителя через замкнутый контур, приведены на рис. 17 (при этом полагается  $H_0 = 235$  м, отношение поперечных сечений АЗ и остального контура  $S_3/S_{кон} = 3,4$ , плотность теплоносителя после выхода из АЗ существенно не меняется). Видно, что при скорости прокачки 5 м/с  $Q_{pr}$  сравнивается с электрической мощностью  $Q_{el}$  рассматриваемой установки. С этого момента данная установка становится энергетически убыточной.

**Заключение.** В результате проведенных исследований установлено, что:

1. Среди всех рассмотренных фотоэлектрических преобразователей наименее подвержены воздействию радиации по своим вольт-амперным характеристикам фотоэлектрические преобразовате-

ли на основе халькопиритов –  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  (CIS или CIGS).

2. При плотности мощности тепловыделения в бочке менее  $0,1 \text{ Вт/см}^3$  основной вклад в нагрев теплоносителя дает удельное тепловыделение в самом газе. Кроме того, плотность мощности тепловыделения в бочках не должна превышать  $0,1 \text{ Вт/см}^3$ .

3. Во избежание расплавления отходов и разрушения бочек при плотности мощности тепловыделения радиоактивных отходов  $0,1 \text{ Вт/см}^3$  скорость прокачки должна быть не менее 2 – 3 м/с.

4. При скорости газа 5 м/с мощность, требуемая для прокачки теплоносителя через замкнутый контур, сравнивается с электрической мощностью рассматриваемой установки.

Из всего этого следует, что оптимальная скорость прокачки теплоносителя через активную зону составляет 3 м/с, гамма-активность радиоактивных отходов не должна превышать  $10^{17} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , а общая удельная мощность тепловыделения в бочках (с учетом стронция-90 и др.) не должна превышать  $0,1 \text{ Вт/см}^3$ . При этом содержание бочек должно быть достаточно прозрачным для гамма-излучения с энергией 662 кэВ.

Дальнейшее улучшение характеристик ЯОП-установки возможно за счет улучшения ее гидродинамических характеристик, повышения рабочего давления ЯОП и подбора компонентного состава содержания бочек с радиоактивными отходами с целью оптимизации прозрачности для гамма-излучения.

### Литература

1. Харитонов В.В. Энергетика. Технично-экономические основы: учебное пособие для вузов / В.В. Харитонов; Федеральное агентство по образованию; Московский инженерно-физический институт (Государственный университет). – 2-е изд., испр. – М.: МИФИ, 2007. – 256 с.: ил.
2. Радиоактивные отходы как источник дешевой электроэнергии / А.В. Карелин, Р.В. Широков // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – Саров: НТЦ «ТАТА», 2006. – № 9 (41). – С. 90 – 92.
3. Карелин А.В. Физические основы реакторлазера / А.В. Карелин. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2007. – 260 с.
4. Пат. 2388087 Российская Федерация, МПК G 21 Н 1/12. Способ преобразования излучения радиоактивных отходов в электрическую энергию / Карелин А.В., Новоселов Ю.Н., Чолах С.О.; заявители и патентообладатели Чолах Сеиф Османович, Карелин Александр Витальевич, Новоселов Юрий Нико-

лаевич. – № 2008114630/06; заявл. 20.10.2009; опубл. 27.04.2010, Бюл. 12.

5. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения, базы и банки данных. В 11 т. Т. XI-4. Газовые и плазменные лазеры / отв. ред. С.И. Яковленко. – М.: Физматлит, 2005. – 822 с.

6. A displacement damage dose analysis of the COMETS and Equator-S space solar cell flight experiments / S. Messenger, R. Walters, G. Summer [et. al.] // Proceedings of the 16<sup>th</sup> European Photo-

voltaic Solar Energy Conference. – Glasgow, 2000. – P. 974 – 977.

7. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

8. Котельников Р.Б. Высокотемпературное ядерное топливо / Р.Б. Котельников, С.Н. Башлыков, А.И. Каштанов [и др.]. – Изд. 2-е. – М.: Атомиздат, 1978. – 432 с.

9. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

*Поступила в редакцию 06.09.2010*

*Александр Витальевич Карелин, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, т. 8-(496)-751-02-79, e-mail: avkarelin@mail.ru.*

*Руслан Владимирович Широков, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, e-mail: srv9@bk.ru.*

*Иван Николаевич Хиблин, инженер, т. 8-(495)-366-14-11, e-mail: vniiem@vniiem.ru.*

*Леонид Алексеевич Амелин, канд. физ.-мат. наук, начальник сектора, 8-(495)-994-54-88.*