

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЕКТНОЙ МОЩНОСТИ СТАНЦИИ ОЧИСТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ПОДРАЗДЕЛЕНИЯХ РАДИОНУКЛИДНОЙ ТЕРАПИИ

Б.Я. Наркевич^{1,2}, Ю.В. Лысак³, И.С. Коновалов⁴, С.В. Ширяев², В.В. Крылов⁵

¹ Институт медицинской физики и инженерии, Москва

² Российский онкологический научный центр им. Н.Н. Блохина, Москва

³ Московский инженерно-физический институт, Москва

⁴ ООО “НТЦ Амплитуда”, Зеленоград

⁵ Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба

В соответствии с действующими нормативными документами, все подразделения радионуклидной терапии должны быть оснащены станциями очистки жидких радиоактивных отходов (ЖРО). При проектировании мощности этих станций приходится учитывать целый ряд факторов физико-технического, инженерного, радиоэкологического и экономического характера. Предложено три различных подхода к расчету указанной мощности. Показано, что наиболее эффективный вариант оборудования для очистки ЖРО может быть определен в рамках подхода, основанного на математическом моделировании процессов выведения радиофармпрепарата из организма больного, а также накопления и выдержки на распад ЖРО в баках-накопителях станции. Для всех 3 указанных подходов регламентированный в последней версии ОСПОРБ-99/2010 норматив по допустимой концентрации ¹³¹I в сбрасываемых ЖРО обуславливает жесткое ограничение потребляемой воды больными в “активных” палатах.

Ключевые слова: подразделения радионуклидной терапии, жидкие радиоактивные отходы, мощность станции очистки, расчетные исследования, математическое моделирование

Введение

В курсах радионуклидной терапии (РНТ) больным III–IV стадии дифференцированным раком щитовидной железы (ДРЩЖ) обычно вводят до 8 ГБк ¹³¹I-йодида натрия, а больным диффузным токсическим зобом (ДТЗ) – до 1,5 ГБк того же радиофармпрепарата (РФП). Поскольку после этого больной становится мобильным источником достаточно мощного гамма-облучения для остальных пациентов и персонала подразделения РНТ, его госпитализируют в так называемую “активную” палату с дополнительной радиационной защитой стен, дверей,

пола и потолка, где он находится в закрытом режиме на протяжении нескольких суток, в зависимости от введенной активности РФП.

Известно, что после перорального введения ¹³¹I накапливается не только в патологических очагах, но и выводится с мочой (40–80 % от введенной активности), фекалиями (2–3 %), выдыхаемым воздухом (1–2 %) и через кожу (3–5 %) [1–4]. В соответствии с действующими нормативными документами [5–8], для предотвращения попадания этих радиоактивных выделений в окружающую среду “активные” палаты и некоторые другие рабочие помещения центра РНТ должны быть оборудованы:

- 1) специальной системой вентиляции с функциями фильтрации радиоактивных аэрозолей ^{131}I и удаления в атмосферу очищенного воздуха;
- 2) системой предотвращения переноса поверхностных радиоактивных загрязнений в “чистые” зоны подразделения РНТ;
- 3) системой спецканализации с функциями накопления, выдержки на радиоактивный распад жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и последующего удаления очищенных от радиоактивности вод в хозяйственно-бытовую канализацию.

К системе спецвентиляции обычно не предъявляется каких-либо специфических требований, в связи с чем ее проектирование обычно не вызывает особых затруднений. Ее конструкция, геометрия расположения воздуховодов и другого вентиляционного оборудования, кратности воздухообмена в различных помещениях, мощность энергопотребления, состав и режим работы основного и резервного оборудования и другие технические и эксплуатационные характеристики конкретизируются на стадии рабочего проектирования в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [5–8].

Система профилактики распространения радиоактивных поверхностных загрязнений также не имеет особой специфики. В ее основе лежит неукоснительное выполнение достаточно простых и разумных правил работы с открытыми радионуклидными источниками, изложенными в [6] и других методических руководствах, например в [8, 9].

В то же время при проектировании центров РНТ к системе спецочистки ЖРО предъявляются достаточно жесткие специфические требования. Они обусловлены целым рядом физико-технических, инженерных, радиоэкологических и экономических факторов:

- 1) высоким общим уровнем активности ^{131}I в потоке ЖРО, удаляемых из “активных” палат и производственных помещений подразделения РНТ;
- 2) возможными нарушениями предписанных правил по пребыванию больных в “активных” палатах, приводящими к различного рода радиационным авариям и инцидентам (рвота радиоактивными массами, засоры канализационных коммуникаций, незапланированный перерасход воды и т.д.);
- 3) значительными вариациями как вводимой активности ^{131}I для каждого пациента из

- 4) вновь поступившей партии больных (выбираемая активность зависит от ряда клинических факторов и состава этой группы пациентов), так и различием темпов выведения ЖРО в систему спецочистки из “активных” палат и из некоторых других производственных помещений подразделения РНТ (фасовочная, моечная, процедурная);
- 4) требованиями нормативных документов [6, 7], в которых по сравнению с предыдущими версиями тех же документов [10, 11] норматив для безопасного сброса ЖРО с ^{131}I без какого-либо научного обоснования был ужесточен в 160 (!) раз, т.е. до 0,62 кБк/кг вместо прежних 100 кБк/кг;
- 5) необходимостью обладания резервами мощности станции очистки ЖРО с учетом возможного изменения состава и численности потока больных, вводимых им активностей ^{131}I , запланированного или неожиданного долгосрочного выхода из строя канализационных коммуникаций и насосного оборудования и т.д.;
- 6) наконец, необходимостью учета возможности клинических испытаний и дальнейшего применения новых терапевтических РФП, например, меченных альфа-излучающими радионуклидами, а также нестандартных технологий их получения и введения в организм больных.

При этом необходимо учитывать, что система спецканализации и спецочистки ЖРО требует больших расходов на капитальное строительство, монтаж, наладку и сертификацию очистного оборудования (иногда до 80 % от общей стоимости строительства и оснащения центра РНТ). Существенными являются также ограничения по размерам требуемой площади для его размещения, по материалам, конфигурации и толщине наружной радиационной защиты баков-накопителей с ЖРО, а также по соблюдению общих санитарно-гигиенических норм обращения с фекальными отходами, в том числе и по подавлению неприятного запаха.

Таким образом, следует констатировать наличие большого количества плохо контролируемых и даже неизвестных факторов, которые превращают процесс проектирования системы спецочистки ЖРО из чисто инженерного в своего рода эвристическую процедуру. Отсюда следует, что для повышения радиационно-гигиенической и экономической эффективности проектирования необходимо использовать всю доступную априорную информацию о поступ-

лении, накоплении, выдержке и удалению ЖРО из системы баков-накопителей как основы всей системы спецочистки ЖРО.

Целью настоящей работы является сравнение трех различных подходов к расчету параметров системы спецочистки ЖРО, при реализации которых степень учета априорной информации будет последовательно возрастать. При этом сложность расчетов неизбежно также будет увеличиваться, но это позволит в значительной степени объективизировать получаемые результаты и тем самым повысить их пригодность для проектирования.

Эмпирический расчет

Наиболее простая версия системы спецочистки ЖРО по своим основным принципам работы практически совпадает с обычной хозяйственно-бытовой канализацией за исключением наличия объемных баков-накопителей для выдержки ЖРО на радиоактивный распад. Технология сбора и удаления ЖРО заключается в следующем: с унитазов в “активных” палатах и из фасовочной и моечной блока радионуклидного обеспечения радиоактивные сливные воды поступают в поочередно заполняемые баки-накопители, где ЖРО выдерживаются на распад необходимый промежуток времени, и после достижения удельной активности ниже установленного норматива (0,62 кБк/кг для ^{131}I), баки поочередно, как правило, с интервалом в несколько недель, опорожняются в хозяйственно-бытовую канализацию. При этом предусматривается использование обычного сантехнического оборудования, т.е. унитазов со сливными бачками объемом до 12 л и негерметизированных канализационных труб. При этом слив использованной воды из водопроводных раковин и душевых установок в “активных” палатах обычно выполняют непосредственно в хозяйственно-бытовую канализацию, хотя это и противоречит одному из требований нормативного документа СанПиН 2.6.2368–07 [8].

Для эмпирического расчета мощности системы спецочистки ЖРО этой версии обычно используются следующие исходные данные:

- m – количество занимаемых больными коек в “активных” палатах отделения РНТ (чел.);
- q – средняя активность ^{131}I , вводимая одному больному в ходе курса РНТ (ГБк/чел.);

$T_{1/2}$ – период полураспада ^{131}I , равный 8,04 сут;

x – средняя доля выведения ^{131}I с мочой в ходе всего курса РНТ (безразмерная или выраженная в %);

k – скорость расходования воды на одного больного или, вернее, скорость поступления ЖРО в бак-накопитель от каждого больного (л/сут на 1 чел.);

V – емкость каждого бака-накопителя (л);

n – количество баков-накопителей на станции спецочистки ЖРО (шт.);

p – коэффициент сменности коек в “активных” палатах на неделю (смена/нед);

c_0 – допустимая концентрация ^{131}I в сливных водах, сбрасываемых в хозяйственно-бытовую канализацию (0,62 кБк/л).

Рассчитаем среднее время заполнения одного бака T^* :

$$T^* = V/(mk) \text{ [сут]} = V/(7mk) \text{ [нед]}. \quad (1)$$

За интервал времени T^* в бак поступит следующая активность Q [ГБк]:

$$Q = qmx \text{ [ГБк]}. \quad (2)$$

Тогда удельная активность в заполненном баке при односменном его заполнении (одна смена из m больных в неделю) составит:

$$c_1 = Q/V = qmx/V \text{ [ГБк/л]}. \quad (3)$$

При p -сменном режиме госпитализации удельная активность составит:

$$c = c_1 p \text{ [ГБк/л]}. \quad (4)$$

С учетом экспоненциального характера радиоактивного распада накопленной в баке активности получим формулу для продолжительности необходимой выдержки T :

$$T = (T_{1/2}/\ln 2) \ln(qm xp/Vc_0) \text{ [сут]}. \quad (5)$$

Тогда общая продолжительность одного цикла накопления и выдержки на распад для каждого бака составляет $T^* + T$. Минимальное количество баков n должно быть таким, чтобы общая продолжительность накопления активности во всех баках была бы не меньше, чем продолжительность этого цикла. При этом значения n , T и T^* должны быть связаны между собой неравенством:

$$nT^* \geq T + T^*. \quad (6)$$

Рассмотрим числовой пример для типового отделения РНТ с простейшей негерметизированной системой спецочистки ЖРО: $m=16$ коек; $q=3$ ГБк/чел.; $x=0,5$; $k=100$ л/сут; $V=38000$ л; $p=2$ смены в неделю. Эти исходные

данные соответствуют показателям строящегося в РОНЦ им. Н.Н. Блохина центра радионуклидной терапии. Здесь следует отметить, что проект станции очистки ЖРО в РОНЦ им. Н.Н. Блохина был разработан исходя из прежнего норматива 100 кБк/л по сбросу ^{131}I в хозяйственно-бытовую канализацию, тогда как новый норматив 0,62 кБк/л привел к резкому повышению требований к мощности станции. Тогда расчет по формуле (1) дает $T^*=23,8 \text{ сут} \approx 3,4 \text{ нед}$. По формуле (5) получаем $T=102 \approx 14,6 \text{ нед}$. Полученные оценки T и T^* дают возможность определить по формуле (6) необходимое количество баков-накопителей:

$$n \geq 1+(T/T^*)=1+102/23,8=5,29$$

Это означает, что при указанных выше исходных данных необходимо оснастить станцию спецочистки ЖРО не менее чем 6 баками-накопителями объемом 38 м³ каждый. Кроме того, нужно еще иметь 1 резервный бак, т.е. полное число баков должно быть не менее 7. Как можно видеть, в рамках данного подхода спроектированная станция из 4 баков емкостью 38 тыс. л каждый по своей мощности не удовлетворяет необходимым требованиям.

Недостатки такого эмпирического подхода:

- 1) отсутствие учета радиоактивного распада в процессе заполнения каждого бака тех ЖРО с ^{131}I , которые ранее уже были накоплены с момента начала заполнения данного бака;
- 2) неправомерное допущение о фактически мгновенном характере поступления ^{131}I в уже заполненный на момент T^* бак-накопитель;
- 3) отсутствие учета неравномерности скорости выведения ^{131}I из организма больного, которая, согласно литературным данным, может варьировать в очень широких пределах, что приводит к значительной вариабельности скорости поступления ЖРО в баки-накопители;
- 4) неучет наличия практически в любом подразделении РНТ двух различных категорий больных, что выражается в принятии соответствующих исходных данных в виде предположения об одинаковой вводимой активности, хотя известно, что больным ДТЗ вводят в среднем 0,5–0,8 ГБк, максимально – до 1,5 ГБк, а больным ДРЦЖ – 3–6 ГБк, максимально – до 8 ГБк;
- 5) заведомо избыточный норматив потребления воды, что обусловлено использованием обычного сантехнического оборудования и наиболее простой версии конструкции стан-

ции спецочистки ЖРО без герметизации дренажных труб и баков-накопителей;

- 6) сливной, а не принудительный характер поступления ЖРО из унитазов через дренажные трубы в баки-накопители приводит к недопустимо высокому количеству засоров, каждый из которых согласно нормативному документу [8] рассматривается как радиационная авария и приводит к временному выходу из строя блока выведения ЖРО из той или иной “активной” палаты.

Расчет с учетом кинетики накопления и распада ^{131}I

Данный подход позволяет избавиться от недостатков 1), 2) и частично 3), а также, при использовании вакуумной системы очистки ЖРО, от недостатков 5) и частично 6).

Предположим, что ЖРО поступают в бак-накопитель непрерывно с постоянной скоростью w ГБк/сут, одинаковой для обеих категорий больных ДТЗ и ДРЦЖ. Это допущение позволяет сформировать простую математическую модель процесса кинетики ЖРО, которая описывается линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\begin{aligned} dQ(t)/dt &= -\lambda Q(t)+w, & 0 < t < T^* \\ dQ(t)/dt &= -\lambda Q(t), & t \geq T^*, \end{aligned} \quad (7)$$

где: $Q(t)$ – активность ^{131}I в накопителе в момент времени t ; λ – постоянная радиоактивного распада ^{131}I , равная $\ln 2/T_{1/2}$; w – скорость поступления активности в бак, равная $pqmx/7$ в терминах предыдущего раздела статьи; T^* – момент времени отключения сброса ЖРО в данный бак-накопитель, причём этот момент одновременно является началом процесса “чистой” выдержки на распад. Решение уравнения (7) есть:

$$Q(t) = \frac{w}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}), \quad 0 < t < T^*, \quad (8)$$

$$Q(t) = \frac{w}{\lambda}e^{-\lambda t}, \quad t \geq T^*. \quad (9)$$

Из формулы (8) можно видеть, что до момента T^* отключения сброса ЖРО активность в баке монотонно нарастает, асимптотически стремясь к величине w/λ , а после T^* по формуле (9) активность экспоненциально убывает вследствие радиоактивного распада. Это означает, что по активности ^{131}I в баке устанавливается динамическое равновесие: нарастание поступающей по системе спецканализации активности компенсируется убыванием ранее по-

ступившей туда же активности за счёт её радиоактивного распада.

В процессе накопления максимальная активность в баке достигает значения, близкого к величине w/λ . Если отключение сброса ЖРО производить при достижении, например, активности $0,9(w/\lambda)$, то соответствии с формулой (2) оптимальным моментом для отключения является:

$$T^* = -\ln 0,1/\lambda = 3,322T_{1/2}. \quad (10)$$

Далее начинается выдержка на распад, продолжительность которой T согласно зависимости (9) определяется по формуле:

$$T = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{w}{\lambda V c_0}. \quad (11)$$

Тогда с учетом формулы (1) и неравенства (6) получаем оценку минимально необходимого количества баков n :

$$n \geq 1 + \frac{T}{T^*} = 1 + \frac{km}{\lambda V} \ln \frac{w}{\lambda V c_0}. \quad (12)$$

Функция (12) является монотонно убывающей с ростом V , причём значение n асимптотически стремится к 1. Это означает, что в общем виде зависимости оптимального значения величины n от объёма V не существует, но при заданных параметрах k , m , w , λ и c_0 значение n может быть рассчитано по формуле (12) при выбранном значении V , и наоборот. При этом задача выбора n может быть однозначно решена в рамках различных критериев оптимизации.

Критерий 1. Если принять экономически ясное требование необходимости минимизации общей продолжительности цикла $T^* + T$, то можно найти оптимальное значение объёма бака-накопителя V_{opt} :

$$T^* + T = \frac{V}{km} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{w}{\lambda V c_0}, \quad (13)$$

$$\frac{d(T^* + T)}{dV} = \frac{1}{km} - \frac{1}{\lambda V} = 0, \quad (14)$$

$$\text{откуда } V_{opt} = km/\lambda. \quad (15)$$

Подставляя полученное по формуле (15) значение V_{opt} в зависимость (12), можно найти оптимальное значение количества баков n_{opt} объемом V_{opt} каждый:

$$n_{opt} \geq 1 + \ln \frac{w}{kmc_0}. \quad (16)$$

Тогда для исходных данных $k=100$ л/сут·чел., $m=16$ коек (т.е. человек), $q=3$ ГБк/чел., $\lambda=0,0862$ сут⁻¹, $p=2$ смены в неде-

лю, $x=0,5$ получаем: $V_{opt}=1,86 \cdot 10^4$ л=18,6 м³, $w=6,86$ ГБк/сут и $n_{opt}=9,84$. Такой результат неприемлем из-за своей экономической неэффективности: оснащать станцию спецочистки ЖРО 11 баками (10 основных и 1 резервный) емкостью по 18,6 куб. м нецелесообразно вследствие большой площади, занимаемой такими баками.

Критерий 2. Рассмотрим возможность минимизации времени выдержки T в зависимости от V . Однако дифференцировать функцию $T(V)$, описываемую формулой (11), не имеет смысла, т.к. эта функция изменяется в зависимости от V монотонно и не имеет экстремума. Следовательно, критерий 2 для оптимизации количества баков-накопителей не пригоден.

Критерий 3. Интересным представляется условие равенства $T = T^*$. Физически это означает, что как только заполнится один бак, другой бак, заполненный ранее и находившийся под выдержкой на распад, тут же опорожняется в хозяйственно-бытовую канализацию. Приравнивая T^* и T , описываемые формулами (1) и (11) соответственно, получаем алгебраическое трансцендентное уравнение относительно неизвестного объёма V :

$$\frac{\lambda V}{mk} = \ln \frac{w}{\lambda V c_0}. \quad (17)$$

Решение уравнения (16) методом половинного деления для тех же исходных данных, которые указаны в разделе “Критерий 1”, позволяет получить значение объёма каждого из двух основных баков, которое с точностью до 0,1 куб. м равно 128 куб. м.

И снова такой результат неприемлем вследствие практически непреодолимых технических трудностей: оснащать станцию спецочистки ЖРО тремя баками (2 основных и 1 резервный) объемом 128 куб. м нецелесообразно из-за сложности размещения, монтажа, барботажа и спецвентиляции таких больших емкостей.

Критерий 4. Аналогичным образом, критерий минимизации собственно количества баков n также технически и экономически не обоснован. Если число баков сделать минимальным, т.е. $n=1$, то дифференцируя уравнение (11) по V и приравнивая 0 получившуюся производную, можно получить соотношение:

$$V_{opt} = \frac{we}{\lambda c_0}, \quad (18)$$

где e – основание натурального логарифма. Для тех же параметров w , λ , и c_0 , что и ранее,

получим $V_{opt} \approx 349$ тыс. куб. м, т.е. нужно соорудить целый бассейн под крышей.

Критерий 5. Наиболее простым из всех рассмотренных критериев является условие $V_{opt} = kmT^*$, вытекающее из формулы (1), где T^* определяется по формуле (10). Тогда для тех же исходных данных получаем $T^* = 26,7$ сут, а $V_{opt} \approx 43$ м³. Поскольку T^* здесь рассчитано по условию накопления активности до значения $0,9(w/\lambda)$, т.е. 90 % от асимптотической активности, то номинальная полная емкость каждого бака должна составлять $V = V_{opt}/0,9 = 47,5$ м³. Тогда при использовании все той же основной формулы (12) и тех же исходных данных получаем:

$$n_{opt} \geq 1 + \frac{mk}{\lambda V_{opt}} \ln \frac{w}{\lambda V_{opt} c_0} = 4,48 \approx 5. \quad (19)$$

Таким образом, при потреблении воды до 100 л/сут·чел. требуется смонтировать 6 баков (5 основных и 1 резервный) каждый номинальной емкостью 47,5 куб. м. Если же потребление воды снизить вдвое на основе использования вакуумной спецканализации, то оптимальное количество баков той же емкости составит $2,736 \approx 3$, т.е. должны быть смонтированы 4 бака (3 основных и 1 резервный).

Однако в РОНЦ им. Н.Н. Блохина проектом уже был предусмотрен монтаж 4 баков (3 основных и 1 резервный), но с номинальной емкостью 38 куб. м. Тогда $V_{opt} = 34,2$ м³. Ясно, что в рамках критерия 5 суммарной емкости этих баков будет недостаточно при $k = 100$ л/сут·чел. Определим, каким должно быть потребление воды, чтобы были выполнены требования новых нормативных документов по обеспечению безопасного сброса в хозяйственно-бытовую канализацию:

$$k = \frac{(n-1)\lambda V_{opt}}{m} \left[\ln \frac{w}{\lambda V_{opt} c_0} \right]^{-1} = 44,8 \text{ л/сут} \cdot \text{чел.} \quad (20)$$

Условие потребления воды из расчета 44,8 л на человека в сутки накладывает слишком жесткие ограничения на бытовые удобства больных, госпитализированных в "активных" палатах. Ясно, что без использования вакуумной системы сброса ЖРО в баки-накопители эти требования не могут быть выполнены.

Расчет на основе моделирования процессов выведения и накопления

Помимо всех факторов, указанных в разделе II и влияющих на мощность станции спецочи-

стки ЖРО, здесь будут учтены медико-физиологические факторы того же влияния, а именно:

1. Структура потока больных. Практика работы МРНЦ им. А.Ф. Цыба показала, что наибольшую пропускную способность отделения обеспечивает следующая схема госпитализации: вначале (например, в понедельник) все m коек занимают больные ДРЦЖ; каждый из них находится в "активной" палате в среднем 4 сут (2 раза по 0,5 сут + 3 полных сут с понедельника по пятницу включительно). В день выписки после дезактивации палат и смены постельного белья те же койки занимают m больных ДТЗ, которые в среднем находятся на них в течение 3 сут (2 раза по 0,5 сут + 2 полных сут с пятницы по понедельник включительно).
2. Не останавливаясь на различных способах расчета вводимых активностей ^{131}I онкологическим и эндокринологическим больным (см. [12]), будем считать, что в среднем больному ДРЦЖ вводят 4 ГБк ^{131}I , а больному ДТЗ – 1 ГБк ^{131}I . Эти данные в целом несколько завышены, хотя, как свидетельствует опыт МРНЦ им. А.Ф. Цыба, бывают клинические случаи, требующие и более высоких значений вводимой активности. Такое завышение сделано сознательно, чтобы расчет мощности станции спецочистки был выполнен по консервативному сценарию.
3. Наиболее сложным является учет скорости выведения ^{131}I из организма пациентов обеих категорий и, следовательно, учет скорости поступления ^{131}I в баки-накопители. В отличие от подхода II, где скорость накопления активности в баках предполагалась $w = \text{const} = 6,86$ ГБк/сут, а $x = \text{const} = 0,5$ (50 %-й выход активности из организма для обеих категорий больных), здесь будем учитывать давно известный в эксперименте и в клинике эффект постепенного снижения выведения ^{131}I из организма больного со временем, причем наиболее точно такое снижение описывается моноэкспоненциальной зависимостью [1, 2, 12].

Тогда исходная система уравнений (7) должна быть преобразована к виду:

$$\begin{aligned} \frac{dR_i(t)}{dt} &= -\lambda R_i(t) - a_i R_i(t) = -(\lambda + a_i) R_i(t) \\ \frac{dQ_i(t)}{dt} &= -\lambda Q_i(t) + a_i R_i(t) \quad 0 \leq t \leq T^* \end{aligned} \quad i=1,2, \quad (21)$$

где $i=1$ относится к категории больных ДРЦЖ, $i=2$ – к категории ДТЗ. Здесь $R(t)$ – функция удержания ^{131}I в организме больного, $Q_i(t)$ – функция накопления в баке активности ^{131}I от больного категории i , тогда как a_i есть скорость выведения ^{131}I из организма больного категории i :

$$a_i = \frac{\ln 2}{T_{1/2}^i}, \quad (22)$$

где $T_{1/2}^i$ – период полувыведения активности ^{131}I из организма больного категории i .

В доступной нам литературе не удалось найти достоверных значений периодов полувыведения $T_{1/2}^1$ для больных ДРЦЖ и $T_{1/2}^2$ для больных ДТЗ. Нормативы допустимой остаточной активности при выписке больных из стационара, согласно [5], составляют 400 МБк ^{131}I при допустимой мощности эквивалентной дозы 20 мкЗв/ч на расстоянии 1 м от тела больного. Опыт МРНЦ им. А.Ф. Цыба показывает, что для подавляющего большинства выписываемых из стационара больных обеих категорий эта мощность дозы близка к указанной, т.е. остаточная активность в теле больного также близка к указанной. Если принять, что у всех больных при выписке из стационара в теле будет содержаться по 400 МБк, то с учетом принятого нами моноэкспоненциального характера выведения ^{131}I при первоначально введенных активностях 4000 и 1000 МБк с продолжительностью пребывания 4 и 3 сут для больных ДРЦЖ и ДТЗ соответствующие периоды биологического полувыведения составят 1,21 и 2,27 сут соответственно. Тогда $a_1=0,575$ и $a_2=0,305$ сут $^{-1}$.

Решение первого уравнения системы (21) есть:

$$R_i(t) = q_i \exp[-(\lambda + a_i)t], \quad R_i(0) = q_i, \quad i=1,2. \quad (23)$$

Подставляя (23) во второе уравнение системы (21), получим:

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = -\lambda Q_i(t) + a_i q_i e^{-(\lambda + a_i)t}. \quad (24)$$

Решение этого дифференциального уравнения есть:

$$Q_i(t) = q_i e^{-\lambda t} (1 - e^{-a_i t}), \quad Q_i(0) = 0, \quad i=1,2. \quad (25)$$

Принимаем $t_1^* = 4$ сут (продолжительность поступления в бак активности от m больных первой смены и всех последующих смен с ДРЦЖ) и $t_2^* = 3$ сут (то же самое для первой смены и всех последующих смен больных с ДТЗ).

Теперь рассчитаем поступившие в бак к моментам t_1^* и t_2^* активности от больных первой и второй категорий соответственно:

$$Q_1(t_1^*) = m q_1 \exp(-\lambda t_1^*) [1 - \exp(-a_1 t_1^*)] = 40,79 \text{ ГБк}, \quad (26)$$

$$Q_2(t_2^*) = m q_2 \exp(-\lambda t_2^*) [1 - \exp(-a_2 t_2^*)] = 7,39 \text{ ГБк}. \quad (27)$$

Таким образом, с учетом радиоактивного распада и снижения темпа выведения активности ^{131}I из организма больного, от 16 больных ДРЦЖ после курса РНТ с введением им по 4 ГБк ^{131}I на момент выписки больных в бак будет содержаться 40,79 ГБк, а от 16 больных ДТЗ с введением им по 1 ГБк ^{131}I туда же добавится еще 7,39 ГБк.

Общее время заполнения бака определяется по формуле (1). Если полное число недель, вычисленное по этой формуле, обозначить как r , то в бак суммарно поступит r раз по $Q_1(t_1^*)$ и r раз по $Q_2(t_2^*)$ активности ^{131}I . При этом для тех же исходных данных и $V=38 \text{ м}^3$ значение $T^* = 23,8 \text{ сут} \approx 4 \text{ нед}$.

Однако активность от каждой смены больных подвергается радиоактивному распаду не только непосредственно в процессе своего поступления в бак, но и после того, т.е. в ходе пребывания в баке вплоть до окончания заполнения всего бака. Тогда для активности, поступившей за первую неделю накопления, можно написать:

$$\begin{aligned} Q_{11}(t_1^*) &= Q_1(t_1^*) \exp[-\lambda(r-1)t_1^* - \lambda r t_2^*], \\ Q_{21}(t_2^*) &= Q_2(t_2^*) \exp[-\lambda(r-1)t_1^* - \lambda(r-1)t_2^*]. \end{aligned} \quad (28)$$

Аналогичные выражения можно составить и для последующих смен вплоть до r . После этого все активности $Q_{1i}(t_1^*)$ и $Q_{2i}(t_2^*)$ ($i=1, \dots, r$) надо просуммировать, чтобы получить полную активность $Q(T^*)$, накопленную в баке ко времени его заполнения T^* с учетом радиоактивного распада за прошедшие pr смен:

$$\begin{aligned} Q(T^*) &= \sum_{i=1}^r Q_{1i}(t_1^*) + \sum_{i=1}^r Q_{2i}(t_2^*) = \\ &= Q_1(t_1^*) \sum_{i=1}^r \exp[-\lambda(r-i)t_1^*] \exp[-\lambda(r-i+1)t_2^*] + \\ &+ Q_2(t_2^*) \sum_{i=1}^r \exp[-\lambda(r-i)t_1^*] \exp[-\lambda(r-i)t_2^*]. \end{aligned} \quad (29)$$

Далее по времени будет только радиоактивный распад до концентрации ^{131}I , равной c_0 . Рассчитаем $Q(T^*)$ со следующими исходными данными $Q_1(t_1^*) = 40,79 \text{ ГБк}$, $Q_2(t_2^*) = 7,39 \text{ ГБк}$,

$V=38 \text{ м}^3$, $k=100 \text{ л/сут}\cdot\text{чел.}$, $T^*=23,8 \text{ сут}\approx 4 \text{ нед.}$, т.е. $r=4$. Тогда $Q(T^*)=78,12 \text{ ГБк}$, а время выдержки наполненного бака с активностью $Q(T^*)$ составляет:

$$T = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{Q(T^*)}{Vc_0} = 94 \text{ сут} \approx 13,4 \text{ нед.} \quad (30)$$

Общее время выдержки составит $T^*+T=23,8+94,0=117,8 \text{ сут}\approx 16,8 \text{ нед.}$ Тогда:

$$n = 1+T/T^*=5,22\approx 5 \text{ баков.} \quad (31)$$

Таким образом, более точный расчет показывает, что при указанных выше исходных данных количество баков емкостью 38 куб. м каждый должно составлять 6 (5 основных и 1 резервный), т.е. не удовлетворяет уже спроектированной и построенной в РОНЦ им. Н.Н. Блохина системе очистки ЖРО из 4 баков.

Устранение этого противоречия возможно только путем ограничения объемов потребляемой воды в центре РНТ. Если вместо $k=100 \text{ л/сут}\cdot\text{чел.}$ использовать более жесткое условие $k=50 \text{ л/сут}\cdot\text{чел.}$, то повторные расчеты по формулам (1) и (29)–(31) дают следующие значения $T^*=47,6 \text{ сут}$, т.е. $r\approx 7 \text{ нед.}$, $Q(T^*)=83,9 \text{ ГБк}$, $T=94,9 \text{ сут}$, $T^*+T=142,5 \text{ сут}\approx 20 \text{ нед.}$, $n=3$ бака. Отметим, что значение $k=50 \text{ л/сут}\cdot\text{чел.}$ может быть реализовано только при оснащении станции очистки ЖРО вакуумной системой спецканализации.

Таким образом, только существенное ограничение потребления воды позволит обеспечить выполнение нормативных требований и соответствие разработанному ранее проекту станции спецочистки ЖРО в РОНЦ им. Н.Н. Блохина. Вполне обоснованно можно полагать, что с аналогичными трудностями сталкиваются и другие центры РНТ, уже построенные и находящиеся в эксплуатации в различных городах России.

Выводы

1. Все более и более точный учет всех физико-технических и физиологических факторов процессов выведения активности из организма, а также заполнения и выдержки баков позволяет оптимизировать конструкцию станции спецочистки ЖРО и тем самым избежать необоснованных материальных и финансовых затрат.
2. Наиболее точный подход к расчету мощности станции спецочистки ЖРО обеспечивает математическое моделирование процес-

сов заполнения и выдержки на радиоактивный распад с учетом скорости выведения ^{131}I из организма госпитализированных больных обеих категорий.

3. Введение нового норматива по предельно-допустимой концентрации ^{131}I в ЖРО, сбрасываемых в хозяйственно-бытовую канализацию, для уже действующих в России центров РНТ обуславливает необходимость либо жесткого ограничения объемов потребляемой воды, которое не может быть реализовано без вакуумной спецканализации, либо снижения пропускной способности центров РНТ.

Список литературы

1. Матусевич Е.С., Колесов В.В., Ставинский В.С. и соавт. Математическое моделирование активности радиойода в щитовидной железе. // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2002, **47**, № 3, С. 51–58.
2. Клепов А.Н., Кураченко Ю.А., Матусевич Е.С. и соавт. Применение методов математического моделирования в ядерной медицине. Под ред. Е.С. Матусевича. — Обнинск, 2006, 204 с.
3. Manual on Therapeutic Uses of Iodine-131. IAEA, Vienna, 1996, 65 pp.
4. Radiological Protection after Nuclear Medicine Procedures. ICRP Publication 94, 2006, 27 pp.
5. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523–09.
6. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010. СП 2.6.1.2612–10. (в ред. изменений № 1, утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 16.09.2013 № 43).
7. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами СПОРО-2002. Изменения и дополнения № 1 к СП 2.6.6.1168-02. СанПиН 2.6.6.2796-10.
8. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников. СанПиН 2.6.2368–07.
9. Костылев В.А., Наркевич Б.Я. Радиационная безопасность в медицине. Учебное пособие. — М.: Издательство “Тривант”, 2014, 202 с.
10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010. СП 2.6.1.2612–10.
11. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002). СП 2.6.6.1168-02.

COMPUTATIONAL STUDIES OF THE POWER STATION CLEANER LIQUID RADIOACTIVE WASTE FOR RADIONUCLIDE THERAPY UNITS

B.Ja. Narkevich^{1,2}, Yu.V. Lysak³, I.C. Konovalov⁴, S.V. Shiryaev², V.V. Krylov⁵

¹ *Institute of Medical Physics and Engineering, Moscow, Russia*

² *N.N. Blokhin Russian Oncological Research Center, Moscow, Russia*

³ *Moscow Engineering Physics Institute, Moscow, Russia*

⁴ *LLC "STC Amplitude", Zelenograd, Russia*

⁵ *A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obrinsk, Russia*

In accordance with applicable regulations, all subdivisions radionuclide therapy must be equipped with stations of purification of liquid radioactive waste. When designing the capacity of these stations must take into account a number of factors of physical, technical, engineering, radiological and economic nature. Proposed three different approaches to the calculation of the specified capacity. It is shown that the most effective way of purification equipment can be determined within the framework of an approach based on mathematical modeling of processes of excretion of the radiopharmaceutical from the body of the patient, and the accumulation of and exposure to the collapse of liquid radioactive waste in tanks-storage station. For all 3 of these approaches is regulated in the latest version of OSPORB-99/2010 the standard for the allowable concentration of ¹³¹I in the discharged liquid radioactive waste leads to a hard limit of water consumed by the patients in the "active" wards.

Key words: unit radionuclide therapy, liquid radioactive waste, power station cleaning, computational study, mathematical modeling

E-mail: narvik@yandex.ru