

Ю.В. Лысак¹, Б.Я. Наркевич^{2,3}, С.В. Ширяев², В.В. Крылов⁴

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЩЕНИЯ С ЖИДКИМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ ПРИ РАДИОНУКЛИДНОЙ ТЕРАПИИ

Yu.V. Lysak¹, B.Ya. Narkevich^{2,3}, S.V. Shiryaev², V.V. Krylov⁴

Mathematical Modeling of Liquid Radioactive Waste in Radionuclide Therapy

РЕФЕРАТ

ABSTRACT

Цель: Определение проектной мощности станции спецочистки в подразделениях радионуклидной терапии на основе математического моделирования процессов накопления и выдержки на распад жидких радиоактивных отходов.

Материал и методы: Моделирование основано на решении системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами в рамках определенных упрощающих допущений относительно указанных процессов накопления и выдержки. Для получения конкретных числовых результатов моделирования использованы технические и клинические параметры для типовых подразделений радионуклидной терапии.

Результаты: Показано, что только наличие вакуумной спецканализации в подразделении радионуклидной терапии обеспечивает выполнение требований нормативных документов по допустимости сброса распавшихся жидких радиоактивных отходов в хозяйственно-бытовую канализацию. Потребление воды госпитализированными в «активные» палаты пациентами не должно превышать 50 л/сут на 1 чел.

Выводы: Математическое моделирование позволяет объективизировать описание процессов обращения с жидкими радиоактивными отходами в подразделениях радионуклидной терапии радиологических клиник России.

Ключевые слова: радионуклидная терапия, жидкие радиоактивные отходы, мощность станции очистки, математическое моделирование

Purpose: To determine the estimated capacity of the station cleaning in special units radionuclide therapy based on mathematical modeling of processes of accumulation and exposure to the collapse of liquid radioactive waste.

Material and methods: The simulation is based on solving a system of linear first order differential equations with constant coefficients under certain simplifying assumptions about these processes of accumulation and exposure. For specific numerical simulation results technical and clinical settings for typical units of radionuclide therapy were used.

Results: It is shown that only the presence of a vacuum in the unit special sewage radionuclide therapy ensures that the requirements of regulations on permissible discharge disintegrated liquid radioactive waste into the domestic sewage. Water consumption was hospitalized in "active" patient rooms should not exceed 50 liters / day for 1 person.

Conclusion: Mathematical modeling allows to objectify the processes of dealing with liquid radioactive waste in radionuclide therapy units of radiological clinics in Russia.

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

Введение

При радионуклидной терапии с введением в организм 1–7 ГБк ¹³¹I больной становится мобильным источником серьезного гамма-облучения для остальных пациентов и персонала подразделения радионуклидной терапии (РНТ). В связи с этим 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 радиофармпрепарата (РФП). Такой режим позволяет минимизировать контакт «заряженного» пациента с персоналом клиники и полностью исключить контакты с родственниками и другими лицами, в том числе и с пациентами того же подразделения РНТ.

При этом от 40 до 80 % от введенной активности ¹³¹I выводится с мочой и может попасть в окружающую среду. Чтобы предотвратить такое попадание, в соответствии с действующими нормативными документами

[1–4] «активные» палаты и некоторые другие рабочие помещения центра РНТ должны быть оборудованы системой спецканализации с функциями накопления, выдержки на радиоактивный распад жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и последующего удаления очищенных от радиоактивности вод в хозяйственно-бытовую канализацию.

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 ¹³¹I 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 радиационным авариям и инцидентам различного рода (рвота радиоактивными массами,

¹ Московский инженерно-физический институт, Москва

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

³ Институт медицинской физики и инженерии, Москва.
E-mail: narvik@yandex.ru

⁴ Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, Обнинск

¹ Moscow Engineering Physics Institute, Moscow, Russia

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

³ Institute of Medical Physics and Engineering, Moscow, Russia.
E-mail: narvik@yandex.ru

⁴ A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk

- засоры канализационных коммуникаций, незапланированный перерасход воды и т.д.);
- 3) значительными вариациями как вводимой активности ^{131}I для каждого пациента из 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 новых нормативных документов [2, 3], в которых по сравнению с предыдущими версиями тех же документов [5, 6] 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; ошибочность и негативные последствия такого изменения уже обсуждались нами ранее [7];
 - 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 получения РФП и их введения в организм больных.

При этом необходимо учитывать, что система 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 толщины 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 поступлении, накоплении, выдержке и удалении ЖРО из системы баков-накопителей как основы всей системы спецочистки ЖРО.

Целью настоящей работы является математическое моделирование процессов обращения с ЖРО, результаты которого позволят объективизировать выбор технических параметров и режимов работы станции спецочистки ЖРО в подразделениях РНТ.

Материал и методы

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.

Для формирования математической модели и последующего расчета мощности системы спецочистки ЖРО были использованы следующие технические параметры и характеристики такой системы:

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

Рассчитаем среднее время заполнения одного бака T^* :

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

Дополнительно следует учесть еще и медико-физиологические факторы, влияющие на проектную мощность станции спецочистки ЖРО:

1. Структура потока больных. Практика работы МРНЦ им. А.Ф. Цыба показала, что наибольшую пропускную способность отделения обеспечивает следующая схема госпитализации: вначале (например, во второй половине дня понедельника) все m коек занимают больные дифференцированным раком щитовидной железы (ДРЩЖ). Каждый из них находится в «активной» палате в среднем 4 сут (2 раза по 0,5 сут + 3 полных суток с понедельника по первую половину дня пятницы включительно). В день выписки после дезактивации палат и смены постельного белья те же койки во вторую половину дня пятницы занимают m больных диффузным токсическим зобом (ДТЗ), которые в среднем находятся на них в течение 3 сут (2 раза по 0,5 сут + 2 полных суток с пятницы по первую половину дня понедельника включительно).

2. Не останавливаясь на различных способах расчета вводимых активностей ^{131}I онкологическим и эндокринологическим больным, будем считать, что в среднем больному ДРЩЖ 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 вопрос определения скорости выведения ^{131}I из организма пациентов обеих категорий и, следовательно, учет скорости поступления ^{131}I в баки-накопители. С этой целью используем давно известный в эксперименте и в клинике эффект постепенного снижения темпа выведения активности ^{131}I из организма больного со временем, причем с достаточной для прикладных целей точностью такое снижение описывается моноэкспоненциальной зависимостью [8, 9].

С учетом всех перечисленных факторов предлагается простая математическая модель процесса кинетики ЖРО, которая описывается системой из двух линейных неоднородных дифференциальных уравнений первого порядка:

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

где $i = 1$ относится к категории больных ДРЩЖ, $i = 2$ – к категории ДТЗ. Здесь $R_i(t)$ – функция удержания ^{131}I в организме больного i -ой категории, $Q_i(t)$ – функция накопления в баке активности ^{131}I от больного категории i , λ – постоянная радиоактивного распада ^{131}I , равная $\ln 2 / T_{1/2}$, тогда как a_i – скорость выведения ^{131}I из организма больного категории i , выраженная в отнормальных единицах сут $^{-1}$:

$$a_i = \frac{\ln 2}{T_{1/2}^i}, \quad (3)$$

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 ДРЩЖ и $T_{1/2}^2$ для больных ДТЗ. Дело в том, что для получения таких данных необходимо проводить многократную радиометрию больных с достаточно высоким содержанием ^{131}I в организме, и подобные измерения обуславливают чрезмерно высокий уровень профессионального облучения персонала, проводящего радиометрию. Чтобы обойти это затруднение, предположим, что у всех больных при выписке из стационара в организме содержится предельно-допустимая активность, необходимая для обеспечения надлежащего уровня радиационной безопасности всех лиц, которые контактируют с больным после его выписки. Нормативы допустимой остаточной активности при выписке больных из стационара, согласно [1], 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 ДРЩЖ 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 (3) есть:

$$R_i(t) = q_i \exp[-(\lambda + a_i)t] \quad R_i(0) = q_i, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

Подставляя (4) во второе уравнение системы (3), получим:

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = -\lambda Q_i(t) + a_i q_i e^{-(\lambda + a_i)t}. \quad (5)$$

Решение этого дифференциального уравнения есть:

$$Q_i(t) = q_i e^{-\lambda t} (1 - e^{-a_i t}) \quad Q_i(0) = 0 \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

Результаты и обсуждение

Рассмотрим числовой пример для типового отделения РНТ с простейшей негерметизированной системой спецочистки ЖРО: $m = 16$ коек; $k = 100$ 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 еще 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.

Принимаем $t_1^* = 4$ сут (продолжительность поступления в бак активности от m больных как первой смены, так и всех последующих смен с ДРЩЖ) и $t_2^* = 3$ сут (то же самое для первой смены и всех последующих смен больных с ДТЗ). Теперь по формуле (6) рассчитаем поступившие в бак к моментам t_1^* и t_2^* активности от больных первой и второй категорий соответственно:

$$Q_1(t_1^*) = m q_1 \exp(-\lambda t_1^*) [1 - \exp(-a_1 t_1^*)] = 40,79 \text{ ГБк} \quad (7)$$

$$Q_2(t_2^*) = m q_2 \exp(-\lambda t_2^*) [1 - \exp(-a_2 t_2^*)] = 7,39 \text{ ГБк} \quad (8)$$

Таким образом, с учетом радиоактивного распада и снижения темпа выведения активности ^{131}I из организма больного, от 16 больных ДРЩЖ после проведенного курса РНТ с введением им по 4 ГБк ^{131}I на момент выписки этих 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 . Тогда 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 непосред-

ственно 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:

$$\begin{aligned} Q_{11}(t_1^*) &= Q_1(t_1^*) \exp[-\lambda(r-1)t_1^* - \lambda r t_2^*] \\ Q_{21}(t_2^*) &= Q_2(t_2^*) \exp[-\lambda(r-1)t_1^* - \lambda(r-1)t_2^*] \end{aligned} \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} Q(T^*) &= \sum_{j=1}^r Q_{1j}(t_1^*) + \sum_{j=1}^r Q_{2j}(t_2^*) = \\ &= Q_1(t_1^*) \sum_{j=1}^r \exp[-\lambda(r-j)t_1^*] \exp[-\lambda(r-j+1)t_2^*] + \\ &+ Q_2(t_2^*) \sum_{j=1}^r \exp[-\lambda(r-j)t_1^*] \exp[-\lambda(r-j)t_2^*]. \end{aligned} \quad (10)$$

Далее по времени будет продолжаться только радиоактивный распад до концентрации ^{131}I , равной c_0 . Рассчитаем $Q(T^*)$ со следующими исходными данными $Q_1(t_1^*) = 40,79$ ГБк, $Q_2(t_2^*) = 7,39$ ГБк, $V = 38 \text{ м}^3$, $k = 100$ л/сут×чел., $T^* = 23,8$ сут ≈ 4 нед, т.е. $r = 4$. Тогда $Q(T^*) = 78,12$ ГБк, а время необходимой выдержки наполненного бака с активностью $Q(T^*)$ составляет:

$$T = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{Q(T^*)}{Vc_0} = 94,0 \text{ сут} \approx 13,4 \text{ нед}. \quad (11)$$

Общее время накопления и выдержки составит $T^* + T = 23,8 + 94,0 = 117,8$ сут $\approx 16,8$ нед. Минимальное количество баков n должно быть таким, чтобы общая продолжительность накопления и выдержки 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:

$$nT^* \geq T + T^*. \quad (12)$$

Тогда:

$$n = 1 + \frac{T}{T^*} = 5,22 \approx 5 \text{ баков}. \quad (13)$$

Таким образом, расчет показывает, что при указанных выше исходных данных количество баков емкостью 38 м^3 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 $k = 100$ л/сут×чел. использовать более жесткое условие $k = 50$ л/сут×чел., то повторные расчеты по формулам (1) и (10) – (13) дают следующие значения $T^* = 47,6$ сут, т.е. $r \approx 7$ нед, $Q(T^*) = 83,9$ ГБк, $T = 94,9$ сут, $T^* + T = 142,5$ сут ≈ 20 нед, $n = 3$ бака. Отметим, что значение $k = 50$ л/сут×чел. может быть реализовано только при оснащении станции очистки ЖРО вакуумной системой спецканализации, обеспечивающей резкое сокращение объемов сбрасываемой через унитазы и водопроводные раковины воды.

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. Математическое моделирование процессов заполнения и выдержки на радиоактивный распад с учетом скорости выведения ^{131}I из организма госпитализированных больных категорий ДРЩЖ и ДТЗ в рамках разумных упрощающих допущений позволяет формализовать описание процессов обращения с ЖРО и, тем самым, объективизировать выбор технических параметров и режимов работы станций спецочистки ЖРО в подразделениях РНТ радиологических клиник России.

2. Непродуманное 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. Последнее является абсолютно неприемлемым, учитывая большие очереди больных на госпитализацию во всех действующих центрах РНТ России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09.
2. 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).
3. 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.
4. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников. СанПиН 2.6.1.2368-08.
5. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010. СП 2.6.1.2612-10.
6. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002). СП 2.6.6.1168-02.
7. Наркевич Б.Я., Ширяев С.В., Крылов В.В. Повышает ли новая версия ОСПОРБ-99/2010 уровень радиационной безопасности в ядерной медицине? // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2015. Т. 60. № 6. С. 5–9.
8. Manual on Therapeutic Uses of Iodine-131. IAEA. Vienna. 1996. 65 pp.
9. Radiological Protection after Nuclear Medicine Procedures. ICRP Publication 94. 2006. 27 pp.

Поступила: 29.01.2016

Принята к публикации: 18.05.2016