



Р и с. 4. Расчетное (—) и экспериментальное трение (●) вдоль горизонтальной координаты для числа Рейнольдса 2500 и $s/d = 1,2$ (а), 5000 и $s/d = 1,4$ (б)

Расчетный коэффициент гидравлического сопротивления ξ и трения τ для диаметра твэла 9 мм, гидравлического диаметра 0,0093 и $s/d = 1,4$ при разном числе Рейнольдса

Re	W, м/с	grad P	Y^+	ξ [6]	τ [6]	Погрешность τ , %
500	0,054	0,027	2,4	0,16	0,07	—
2500	0,269	0,17	4,5	0,043	0,388	5
5000	0,539	0,528	7	0,033	1,198	5
10 000	1,070	1,454	9	0,023	3,299	7

$$\xi = \text{grad } PD_h / 0,5\rho w^2,$$

где P — давление; D_h — гидравлический диаметр; ρ — плотность; w — скорость, и коэффициент трения $\tau = \xi\rho w^2/8$. Относительное отклонение коэффициента трения не превышает 7%.

Заключение. Таким образом, CFD-код CONV-3D может быть использован для расчета

тепло- и гидродинамических параметров течения (локальное трение, коэффициент гидравлического сопротивления) в пучках твэлов в ламинарном, переходном и турбулентном режиме.

Сравнение показало, что при разных числах Рейнольдса и отношении s/d относительное отклонение скорости теплоносителя, рассчитанное с помощью кода CONV-3D, от экспериментального в поточечной норме не превысило 10%, коэффициента трения — 15%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девкин А.С., Мелихов О.И., Москалев А.М. и др. Зарубежные теплогидравлические коды улучшенной оценки. Опыт разработки, создание и применение. М., ОЦРК при Минатоме РФ, 2000. 176 с.
2. Будников А.В., Шмелев Е.И., Куликов Д.А. и др. Измерения гидродинамических и вибрационных характеристик для валидации численных расчетов возбуждения конструкций потоком жидкости. — Приборы и методы измерений, 2019, т. 10, № 3, с. 223—232.
3. Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Макаревич А.А. и др. Применение CFD-кода CONV-3D в реакторных приложениях. — Атомная энергия, 2016, т. 121, вып. 3, с. 140—143. // Chudanov V.V., Aksenova A.E., Makarevich A.A. et al. Use of the CFD-code CONV-3D in Reactor Applications. — Atomic Energy, 2017, v. 121, № 3, p. 179—184.
4. Аксенова А.Е., Первичко В.А., Чуданов В.В. и др. Геометрический редактор Geometry_Editor для вычислительного модуля CONV-3D: Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ—2015-03, 2015. 40 с.
5. Аксенова А.Е., Коротов А.А., Первичко В.А., Чуданов В.В. Редактор сценария EditInp вычислительного модуля CONV-3D: Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ—2018-11, 2018. 54 с.
5. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 3. Теплогидравлические процессы при переходных и нестандартных режимах. Тяжелые аварии. Защитная оболочка. Коды, их возможности, неопределенности. М.: ИздАт, 2014. 688 с.

Поступила в Редакцию 26.11.19

УДК 621.039.31

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО КАСКАДА ЦЕНТРИФУГ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ

Азизов Т.Э., Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)

e-mail: t.e.azizov@gmail.com

В практике получения стабильных изотопов методом газовой центрифуги часто используют каскады с одинаковым по ступеням потоком питания, или прямоугольные каскады [1, 2]. Такие каскады относительно просто реализуемы,

что делает удобным их использование, в частности, при разделении нескольких изотопных смесей в одном каскаде [2, 3]. Одним из примеров является обогащение применяемого в гелиево-кадмиевых лазерах ^{116}Cd до концентрации не

менее 95% [3]. Другой характерный пример — обогащение ^{124}Xe до концентрации 99,99% [2]. Учитывая, что природное содержание ^{124}Xe составляет ~0,09%, его концентрирование проводят в несколько этапов [1—3]. В обоих описанных случаях целесообразно использовать прямоугольный каскад, поскольку настройка его параметров для следующего этапа наработки изотопа существенно проще изменения параметров профилированного каскада.

Важную роль в эффективном получении изотопа играют предварительный расчет и оптимизация параметров разделительной установки. Одним из часто встречающихся является расчет параметров каскада заданной конфигурации, или поверочный расчет [2, 4, 5]. Его суть заключается в следующем: при заданной конфигурации разделительного каскада (число, номер ступени подачи внешнего питания, распределение потока питания ступеней каскада) и параметрах исходной смеси необходимо определить концентрацию компонентов смеси в выходящих потоках, а также распределение концентрации компонентов по длине каскада. Для этого используют разные итерационные методы, основанные на последовательном расчете параметров каждой ступени каскада с уточнением ориентировочно принятых начальных приближений для концентрации в выходящих внешних потоках [2].

Для практики интересен и другой проекторочный расчет каскада. В этом случае, как правило, заданы требуемая концентрация целевого компонента во внешних потоках и поток отбора. При этом необходимо найти конфигурацию каскада и его внутренние параметры, при которых концентрация целевых компонентов в выходящих потоках совпадет с требуемой. Из всех возможных комбинаций параметров каскада необходимо выбрать ту, которая удовлетворяет заданному критерию эффективности, например, минимально возможному числу разделительных элементов в каскаде.

Основная проблема при таком расчете состоит в поиске оптимальной конфигурации каскада, обеспечивающей выполнение заданных внешних условий. При этом варьируемые переменные (число, номер ступени подачи питания, потоки питания ступеней и др.) в случае центробежного метода разделения являются комбинированными: целочисленными и действитель-

ными величинами. Такая особенность осложняет многомерную оптимизацию и сужает методы ее решения.

Оптимизация параметров прямоугольного каскада при заданной концентрации целевого компонента в выходящих потоках заключается в применении метода Хука—Дживса для поиска оптимальной конфигурации [6]. При этом отдельно организован перебор числа ступеней в каскаде и номера ступени подачи питания. Одна из основных сложностей реализации подобного алгоритма заключается в выборе подходящих начальных приближений для концентрации компонентов в выходящих потоках каскада, и эта сложность нарастает с увеличением числа компонентов.

В настоящей работе предложен метод оптимизации параметров прямоугольного каскада, устойчивый к заданию начальных приближений для концентрации компонентов в выходящих потоках независимо от их числа. Это позволяет эффективнее реализовать расчет и оптимизацию параметров прямоугольного каскада для разделения многокомпонентных смесей.

Описание метода. Рассмотрим прямоугольный каскад, имеющий внешний поток питания F , отбора P и отвала W . Под отбором будем понимать выходящий поток каскада, на котором происходит обогащение наиболее легким компонентом, потоком отвала — тот, в котором обогащается самый тяжелый. Концентрацию i -го компонента в соответствующем потоке обозначим C_i^F , C_i^P , C_i^W ($i = 1, \dots, m$, где m — число компонентов разделяемой смеси). Здесь и далее концентрация компонентов разделяемых смесей выражена в мольной доле. Перечисленные параметры называют внешними параметрами каскада. Внутренними параметрами являются поток питания (производительность ступени) L_s , концентрация $C_{i,s}$ ($i = \overline{1, m}$), выходящие из ступени потоки, обогащенные L'_s и обедненные легкими компонентами L''_s , концентрацией $C'_{i,s}$ и $C''_{i,s}$ ($i = \overline{1, m}$). В случае прямоугольного каскада $L_s = \text{const} \equiv L$. Конфигурацию каскада определяют число ступеней в нем N и номер ступени подачи внешнего питания f .

Задачу оптимизации параметров подобного каскада можно сформулировать следующим об-

разом. Пусть задана требуемая концентрация n -го компонента в потоках отбора C_n^P и отвала каскада C_n^W , параметры исходной смеси и коэффициент разделения на единичную разность массовых чисел для одиночного разделительного элемента q_0 . Необходимо определить отношение потоков P/L , W/L , F/L , конфигурацию и внутренние параметры каскада, обеспечивающие выполнение заданного критерия эффективности. В предположении идентичности характеристик разделительных элементов в каскаде в качестве критерия эффективности удобно использовать суммарный поток каскада [7].

Как уже было отмечено, сформулированная задача представляет собой оптимизацию на пространстве переменных смешанного типа, поскольку переменные N и f изменяются дискретно, искомые отношения потоков непрерывно. Рассмотрим предлагаемый метод.

Учитывая специфику, оптимизацию предложено разбить на две составляющие: нахождение параметров каскада заданной длины для получения требуемой концентрации на выходе и перебор различных комбинаций переменных N и f в целях выбора среди всех конфигураций, которые обеспечивают получение заданной концентрации, наилучшей по выбранному критерию эффективности.

Рассмотрим каждую составляющую. Зафиксируем одну из возможных комбинаций переменных N и f . Если известны соотношения внешних потоков, то несложно осуществить проверочный расчет параметров каскада и определить концентрацию C_i^P , C_i^W , пользуясь одним из предложенных для этого методов. В настоящей работе был использован метод, основанный на приближении фактора разделения каскада [5, 8, 9]. Его преимуществами являются высокая устойчивость к заданию начальных приближений для концентрации компонентов разделяемой смеси во внешних потоках каскада и высокая скорость сходимости итерационной процедуры. На основе данного метода можно построить процедуру расчета параметров каскада заданной длины для получения заданной концентрации целевого компонента в выходящих потоках. Приведем шаги реализации подобной процедуры.

Внешние потоки и концентрация компонентов в них в стационарном режиме и в отсутствие

потерь рабочего вещества на ступенях связаны уравнениями баланса, которые можно записать в виде

$$\frac{F}{L} - \frac{P}{L} - \frac{W}{L} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{F}{L} C_i^F - \frac{P}{L} C_i^P - \frac{W}{L} C_i^W = 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Если задать для n -го компонента концентрацию C_n^P и C_n^W и, например, величину P/L , то из системы (1), (2) можно найти величины W/L и F/L .

Разделим рассматриваемый каскад на участки (секции), заключенные между ступенями, из которых отбирают продукт или подают внешнее питание. В рассматриваемом случае каскад состоит из двух секций: обогатительной и обеднительной. Выражения для транзитных потоков в обогатительной секции в направлении от отбора к отвалу можно записать в виде [8]

$$\theta_s - (1 - \theta_{s+1}) = P/L; \quad (3)$$

$$\tilde{C}'_i = \frac{1}{\theta_s} \left[(1 - \theta_{s+1}) \frac{\tilde{C}'_{i,s+1}}{\sum_{j=1}^m q_{ij} \tilde{C}'_{j,s+1} C_j^P} + \frac{P}{L} \right], \quad (4)$$

$$s = \overline{f, N}, \quad i = \overline{1, \dots, m},$$

где $\theta_s = L'_s/L_s$ — коэффициент деления потока ступени с номером s ; q_{ij} — относительный коэффициент разделения пары компонентов с номерами i и j ; $\tilde{C}'_i = C'_i/C_i^P$ — относительная концентрация.

Соответствующие выражения для обеднительной секции имеют вид

$$\theta_s L - (1 - \theta_{s+1}) = -W/L; \quad (5)$$

$$\tilde{C}''_{i,s+1} = \frac{1}{1 - \theta_{s+1}} \left[\theta_s \frac{\tilde{C}''_{i,s}}{\sum_{j=1}^m q_{ij}^{-1} \tilde{C}''_{j,s} C_j^W} + \frac{W}{L} \right], \quad (6)$$

$$i = \overline{1, m}, \quad s = \overline{1, f},$$

где $\tilde{C}''_i = C''_i/C_i^W$ — относительная концентрация.

Для относительной концентрации справедливы граничные условия

$$\tilde{C}'_i(1) = 1, \quad i = \overline{1, m}; \quad \tilde{C}'_i(N) = 1, \quad i = \overline{1, m}. \quad (7)$$

Если известны величины θ_1 , θ_N , P/L и W/L , то, используя уравнения (3)—(7) совместно с (1), (2), можно последовательно рассчитать внутренние параметры каскада от его концов к

ступени подачи питания. Для получения корректного решения расчет повторяется до тех пор, пока сумма невязок по всей концентрации компонентов во внешних потоках не уменьшится до требуемой, которая определяется необходимой погрешностью расчета [5].

Если задать θ_1 , θ_N и концентрацию C_n^P , C_n^W , то для нахождения параметров каскада заданной длины с фиксированной ступенью подачи питания, обеспечивающих получение требуемой концентрации на его концах, достаточно найти одну из величин P/L , W/L или F/L , после чего система (1), (2) станет замкнутой. Найти одну из перечисленных величин, например, P/L можно, решив нелинейное уравнение для суммы невязок по концентрации целевого компонента в выходящих потоках. Данная сумма фактически является функцией от искомого отношения и может быть представлена в виде

$$\Delta = \Delta(P/L) = |\Delta_P| + |\Delta_W|, \quad (8)$$

где Δ_P , Δ_W — разность расчетной и заданной концентрации целевого компонента в потоках P и W соответственно.

В этом случае задача сводится к численному решению уравнения (8). На каждой итерации при поиске корня выражения (8) рассчитываются параметры каскада методом приближения фактора разделения, что требует определенного машинного времени. Поэтому для решения данной задачи использован метод Брента из-за его быстрой сходимости и устойчивости к начальным приближениям [10].

На основе описанной процедуры расчета прямоугольного каскада на заданную концентрацию целевого компонента можно реализовать процедуру поиска N и f , при которых суммарный поток будет наименьшим при заданном отборе. В рамках работы использовали прямой перебор величин N и f . Для выбора граничного числа ступеней N для определения диапазона перебора в качестве начального приближения рассчитывали модельный R -каскад, обеспечивающий получение той же концентрации в выходящих потоках [11]. На основе предварительного анализа в качестве верхней границы выбрали число ступеней в R -каскаде.

Результаты и обсуждение. Для проверки корректности разработанного метода был проведен расчет оптимальных параметров прямо-

угольного каскада для разделения смеси изотопов кремния в виде SiF_4 . В качестве проверочного варианта рассмотрено получение концентрации ^{28}Si в потоках отбора и отвала, равной $C_1^P = 99,99\%$, $C_1^W = 0,01\%$ соответственно. Концентрация изотопов кремния в природной смеси приведена в табл. 1 [6]. Отбор каскада составлял 1 г/с, коэффициент разделения на единичную разность массовых чисел принят равным $q_0 = \sqrt{3}$ [6]. В табл. 2 приведены результаты сравнения оптимальных параметров прямоугольных каскадов, рассчитанных предложенным в настоящей работе методом и методом работы [6]. Из сопоставления данных следует, что параметры конфигурации каскада и суммарный поток каскадов совпадают с точностью до 0,01. Это свидетельствует о том, что разработанный метод позволяет получать корректные результаты. Удовлетворительное совпадение результатов можно объяснить тем, что, по сути, методы схожи. Фактически предложенный метод является модификацией метода [6] в части единичного расчета параметров каскада, что позволяет решить проблему его чувствительности к начальным приближениям для концентрации компонентов в выходящих потоках каскада.

Т а б л и ц а 1. Природный состав изотопов кремния

Компонент	Массовое число изотопа	C_i^F
1	104	92,21
2	105	4,7
3	106	3,09

Т а б л и ц а 2. Параметры оптимального прямоугольного каскада для разделения изотопов кремния, полученные с использованием разных оптимизационных методов

Параметр	Метод	
	предлагаемый	[6]
C_{1P} , %	99,99	99,99
C_{2P} , %	0,01	—
C_{3P} , %	0	—
C_{1W} , %	0,01	0,01
C_{2W} , %	60,28	—
C_{3W} , %	39,71	—
N	52	52
f	25	25
ΣL , г/с	291,31	291,31

Покажем возможность использования предложенного метода для разделения смесей с большим числом компонентов. В качестве примера рассмотрим прямоугольный каскад для разделения природной смеси изотопов кадмия в виде диметила кадмия [8]. Состав исходной смеси приведен в табл. 3. В качестве целевого компонента выбран ^{116}Cd , который целесообразно концентрировать в обогащенном тяжелыми компонентами потоке каскада, условно названным ранее отвалом. Концентрация ^{116}Cd в выходящих потоках выбрана равной $C_8^W = 95\%$, $C_8^P = 0,648\%$ [2, 3]. Коэффициент разделения, приходящийся на единичную разность массовых чисел, принят равным $q_0 = 1,09$ [2], поток W составил 1 г/с. Расчеты показали, что оптимальными для прямоугольного каскада являются число ступеней $N = 62$, номер ступени подачи питания $f = 37$, суммарный поток $\Sigma L = 7791,14$ г/с. Концентрация компонентов смеси в выходящих потоках приведена в табл. 4.

Таблица 3. Концентрация смеси изотопов кадмия природного состава

Компонент	C_i^F , %
^{106}Cd	1,25
^{108}Cd	0,89
^{110}Cd	12,49
^{111}Cd	12,8
^{112}Cd	24,13
^{113}Cd	12,22
^{114}Cd	28,73
^{116}Cd	7,49

Таблица 4. Концентрация смеси изотопов в выходящих потоках оптимального прямоугольного каскада

Компонент	Концентрация в потоке	
	отбора P , %	отвала W , %
^{106}Cd	1,35	$1,17 \cdot 10^{-13}$
^{108}Cd	0,96	$8,07 \cdot 10^{-11}$
^{110}Cd	13,47	$1,17 \cdot 10^{-6}$
^{111}Cd	13,8	$4,01 \cdot 10^{-5}$
^{112}Cd	26,02	$2,64 \cdot 10^{-2}$
^{113}Cd	13,17	$5,02 \cdot 10^{-2}$
^{114}Cd	30,58	4,92
^{116}Cd	0,648	95

Для проверки корректности полученных результатов сравнили параметры оптимального

прямоугольного каскада с параметрами R -каскада с несмешиванием по компонентам ^{114}Cd и ^{116}Cd , соответствующего тем же внешним условиям. Предварительные расчеты показали, что выбранная пара компонентов примерно соответствует оптимальным условиям концентрирования изотопа ^{116}Cd . Отметим, что при относительно больших коэффициентах разделения R -каскад не может обеспечить строгое совпадение концентрации в выходящих потоках с соответствующей концентрацией в прямоугольном каскаде. Подобное совпадение возможно лишь в случае дробных значений числа ступеней в R -каскаде, что имеет смысл только для теоретических расчетов в целях оценки интегральных характеристик каскада. Поэтому после нахождения дробных значений для величин N и f в R -каскаде необходимо их округление в разные стороны для выбора варианта, отвечающего наименьшему суммарному потоку и для которого концентрация целевого компонента в отборе не ниже заданной, в отвале — примерно соответствует заданной. Найденные параметры R -каскада, соответствующего таким условиям, были следующими: число ступеней $N = 79$, номер ступени подачи питания $f = 50$. В расчете коэффициент разделения на единичную разность массовых чисел соответствовал принятому для прямоугольного каскада $q_0 = 1,09$.

В табл. 5 приведена концентрация компонентов в выходящих потоках R -каскада. Относительный суммарный поток R -каскада составил 5637,98 г/с, что соответствует примерно 72% суммарного потока прямоугольного каскада, что можно считать эффективной аппроксимацией конического профиля R -каскада.

Таблица 5. Концентрация смеси изотопов в выходящих потоках R -каскада с несмешиванием по компонентам ^{114}Cd и ^{116}Cd

Компонент	Концентрация в потоке	
	отбора P , %	отвала W , %
^{106}Cd	1,35	$2,47 \cdot 10^{-16}$
^{108}Cd	0,96	$9,71 \cdot 10^{-13}$
^{110}Cd	13,47	$7,53 \cdot 10^{-8}$
^{111}Cd	13,81	$5,74 \cdot 10^{-6}$
^{112}Cd	26,03	$8,04 \cdot 10^{-4}$
^{113}Cd	13,18	$3,01 \cdot 10^{-2}$
^{114}Cd	30,6	4,9
^{116}Cd	0,601	95,06

Заключение. Предложенный метод оптимизации параметров прямоугольного каскада позволяет избежать поиска начальных приближений для концентрации компонентов разделяемой смеси в выходящих потоках. Сравнение предложенного метода с другими, а также с параметрами модельного *R*-каскада показало возможность его использования для оптимизации параметров прямоугольного каскада при разделении смесей с произвольным числом компонентов.

Метод может быть обобщен на случай каскадов из участков прямоугольного профиля потока (прямоугольно-секционированных каскадов), а также применен для расчета оптимальных параметров прямоугольных каскадов независимо от метода разделения. В частности, он может быть использован для оптимизации параметров разделительных аппаратов колонного типа.

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда (проект № 18-79-00249).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orlov A.A., Ushakov A.A., Sovach V.P., Mymrina D.F. Modeling of nonstationary processes during separation of multicomponent isotope mixtures. — Sep. Sci. Technol., 2018, v. 53, № 5, p. 796—806.
2. Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей. Учебное пос. М., НИЯУ МИФИ, 2011. 368 с.
3. Aisen E.M., Borisevich V.D., Potapov D.V. e.a. Computing experiments for study of cadmium isotope separation by gas centrifuges. — Nucl. Instrum. Meth., 1998, v. 417, № 2—3, p. 428—433.
4. Zeng S., Ying C. A Method of separating a middle component in multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge cascades. — In: Proc. 7th Workshop of Separation Phenomena in Liquids and Gases. Moscow, Russia, 2000, p. 100.
5. Потапов Д.В., Сулаберидзе Г.А., Холпанов Л.П. Расчет прямоугольно-секционированного каскада путем приближения фактора разделения. — Теорет. основы хим. технологии, 2000, т. 34, № 2, с. 147—151.
6. Палкин В.А., Фролов Е.С. Расчет и свойства прямоугольного каскада с заданными внешними концентрациями по целевому изотопу. — В сб.: VII Всерос. (международная) научная конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». Звенигород, 2002 г., с. 124—129.
7. Sulaberidze G.A., Mustafin A.R., Smirnov A.Yu. e.a. Optimization of cascades with variable overall separation factors by various efficiency criteria. — J. Phys.: Conf. Ser., 2018, v. 1099, p. 012009.
8. Холпанов Л.П., Цюаньсинь Се, Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д. Расчет прямоугольного каскада с потерями рабочего вещества на ступенях и в коммуникациях при разделении многокомпонентных изотопных смесей. — Атомная энергия, 2008, т. 104, вып. 1, с. 17—23. // Kholpanov L.P., Tsyuan'sin' Se, Sulaberidze G.A., Borisevich V.D. Calculation of a Square Cascade with Losses of the Working Material in the Steps and Pipelines during Separation of Multicomponent Isotopic Mixtures. — Atomic Energy, 2008, v. 104, № 1, p. 23—32.
9. Xie Q., Yikun C. An efficient method for calculating multicomponent square cascades. — In: Proc. 11th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases. Saint-Petersburg, 13—18 June, 2010, p. 114—121.
10. Brent R. Algorithms for Minimization without Derivatives. Englewood Cliffs, NY: Prentice-Hall, 1973. Ch. 3—4.
11. De la Garza A., Garrett G., Murphy J. Multicomponent isotope separation in cascades. — Chem. Engng Sci., 1961, v. 15, p. 188—209.

Поступила в Редакцию 10.03.20

УДК 539.125.52:621.384.654

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ С ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ ТИПА ЧАСТИЦ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ НЕЙТРОННЫХ И ГАММА-ИСТОЧНИКОВ В СМЕШАННЫХ ПОЛЯХ

Прокуронов М.В., Севастьянов В.Д., Янушевич А.В., Шубаев Р.М. (ВНИИФТРИ, Менделеево)
e-mail: n10381@yandex.ru

Актуальной проблемой в современной ядерной физике, ядерной энергетике и ядерной медицине является измерение спектральных и временных характеристик смешанных нейтронных и гамма-полей [1, 2]. Наибольшую информацию в таких экспериментах можно получить, используя детекторы, которые позволяют избирательно регистрировать электроны и протоны.

К ним относятся сцинтилляционные детекторы с цифровой идентификацией частиц по форме импульса и черенковские, которые регистрируют релятивистские частицы при превышении ими световой скорости, в том числе в импульсном режиме [3].