

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**А.А. Орлов, М.В. Верлинский**

**ТЕОРИЯ  
ПРОТИВОТОЧНО-СИММЕТРИЧНЫХ КАСКАДОВ  
ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ УРАНА**

*Рекомендовано в качестве учебно-методического пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2021

УДК 621.039.34(075.8)  
ББК 24.13:24.126я73  
О-66

**Орлов А.А.**

О-66 Теория противоточно-симметричных каскадов для разделения изотопов урана : учебно-методическое пособие / А.А. Орлов, М.В. Верлинский ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 63 с.

ISBN 978-5-4387-1021-9

Пособие включает в себя описание математической модели, программного обеспечения, в котором реализована данная математическая модель, алгоритмы расчета и оптимизации противоточно-симметричных каскадов, а также десять практических индивидуальных заданий для студентов по вариантам.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по профилю «Физика кинетических явлений» направления 14.03.02 «Ядерная физика и технологии».

УДК 621.039.34(075.8)  
ББК 24.13:24.126я73

*Рецензенты*

Доктор физико-математических наук, профессор  
заведующий кафедрой математической физики ТГУ  
*А.Ю. Крайнов*

Доктор физико-математических наук, профессор  
заведующий отделом № 10 НИИ ПММ ТГУ  
*В.А. Архипов*

ISBN 978-5-4387-1021-9

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2021  
© Орлов А.А., Верлинский М.В., 2021  
© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время противоточно-симметричные каскады газовых центрифуг (ГЦ) используются для промышленного обогащения урана, а также для опытно-промышленного производства стабильных и радиоактивных изотопов около 30 химических элементов периодической системы Д.И. Менделеева. Кроме того, противоточно-симметричные каскады ГЦ применяются для очистки гексафторида урана от примесей и получения особо чистых веществ.

Величина однократного коэффициента разделения у многих методов разделения изотопов невелика, поэтому для получения высокой степени обогащения требуется многократное повторение процесса в ступенях, соединенных последовательно и образующих каскад. Таким образом, в потоке легкой (либо тяжелой) фракции каскада обеспечивается заданная концентрация целевого изотопа. Газовые центрифуги в ступенях соединяются параллельно, обеспечивая необходимую производительность, что позволяет реализовать каскады по форме, очень близкие к идеальному каскаду и обеспечить на отборном конце каскадов заданную производительность. На практике для разделения изотопов урана нашли применение противоточно-симметричные каскады ГЦ, поэтому в представленных практических занятиях будут рассмотрены именно эти каскады.

Данные методические указания по выполнению практических заданий содержат описания математической модели противоточно-симметричных каскадов для разделения изотопов урана и программы «Расчет каскада», в которой реализована данная математическая модель, 10 практических заданий. Для более подробного изучения теории каскадов для разделения двухкомпонентных смесей советуем изучить пособие [1].

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1. Основные расчетные соотношения

На рис. 1.1 представлена расчетная схема противоточно-симметричного каскада газовых центрифуг.

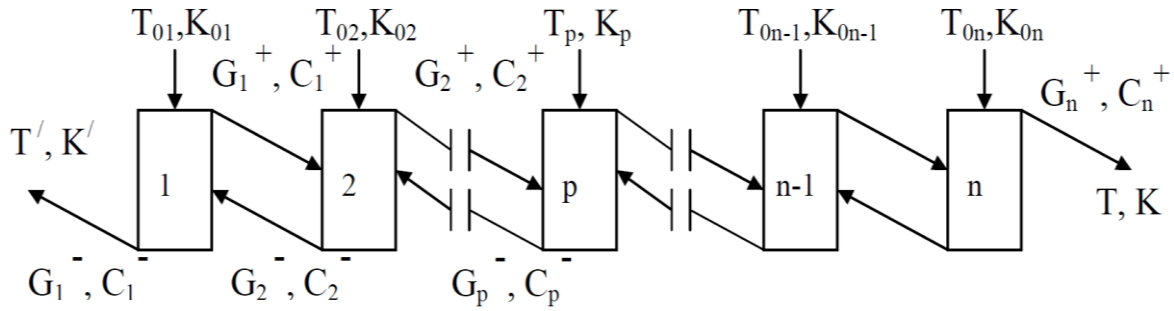


Рис. 1.1. Схема противоточно-симметричного каскада

Приведенные на схеме потоки и концентрации каскада и ступеней связаны между собой уравнениями баланса по веществу и целевому изотопу.

Внешние параметры каскада связаны уравнениями баланса:

а) для рабочего вещества

$$T + T' = \sum_{j \neq p} T_{0j} + T_p; \quad (1.1)$$

б) для легкого изотопа

$$TK + T'K' = \sum_{j \neq p} T_{0j} K_{0j} + T_p K_p. \quad (1.2)$$

Аналогичные уравнения записывают и для внутренних параметров. Потоки и концентрации каждой ступени удовлетворяют соотношениям:

$$G_j^+ + G_j^- = G_j; \quad j = \overline{1, n}; \quad (1.3)$$

$$G_j^+ C_j^+ + G_j^- C_j^- = G_j C_j; \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.4)$$

Связь между ступенями характеризуется уравнениями

$$G_1 = G_2^- + T_{01}, \quad G_2 = G_1^+ + G_3^- + T_{02}, \quad \dots, \quad G_n = G_{n-1}^+ + T_{0n}; \quad (1.5)$$

$$G_1 C_1 = G_2^- C_2^- + T_{01} K_{01}, \quad (1.6)$$

$$G_2 C_2 = G_1^+ C_1^+ + G_3^- C_3^- + T_{02} K_{02}, \quad \dots, \quad G_n C_n = G_{n-1}^+ C_{n-1}^+ + T_{0n} K_{0n}.$$

Разделительные характеристики задают зависимость полного коэффициента разделения  $\chi_j$  от потока питания ГЦ  $g_j$  и коэффициента деления потока  $\theta_j$ . Полные коэффициенты разделения ступеней согласно определению равны:

$$\chi_j = \frac{C_j^+}{1 - C_j^+} \bigg/ \frac{C_j^-}{1 - C_j^-}; \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.7)$$

Их рассчитывают в соответствии с принятой в модели зависимостью

$$\chi_j = \exp(a_0 + a_1 \theta_j - a_2 \theta_j^2 - a_3 \ln g_j); \quad j = \overline{1, n}, \quad (1.8)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – задаваемые коэффициенты.

Коэффициент деления потока  $\theta_j$  и поток питания ГЦ  $g_j$  ступеней рассчитывают по формулам:

$$\theta_j = G_j^+ / G_j; \quad g_j = G_j / N_j; \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.9)$$

Внешние и внутренние параметры каскада связаны граничными условиями:

$$G_1^- = T'; \quad C_1^- = K'; \quad G_n^+ = T; \quad C_n^+ = K. \quad (1.10)$$

При заданных независимых параметрах расчет концентраций отбора легкой и тяжелой фракций ступеней проводят, начиная с первой ступени (отбора тяжелой фракции каскада) по рекуррентным формулам:

$$C_j^+ = \frac{\chi_j C_j^-}{1 + (\chi_j - 1) C_j^-}; \quad j = \overline{1, n}; \quad (1.11)$$

$$C_j^- = C_{j-1}^+ \left(1 - \frac{\tau_j'}{G_j^-}\right) + \frac{\tau_{nj}'}{G_j^-}; \quad j = \overline{2, n}, \quad (1.12)$$

где  $\tau_j'$ ,  $\tau_{nj}'$  – транзитные потоки, равные:

$$\tau_1' = T'; \quad \tau_{n1}' = T' K'; \quad (1.13)$$

$$\tau_j' = \tau_{j-1}' - T_{0j-1}; \quad \tau_{nj}' = \tau_{nj-1}' - T_{0j-1} K_{0j-1}; \quad j = \overline{2, n}, \quad j \neq p;$$

$$\tau_{p+1}' = \tau_p' - T_p; \quad \tau_{np+1}' = \tau_{np}' - T_p K_p.$$

Аналогичным образом через транзитные потоки вычисляют неизвестные потоки ступеней. При этом используются соотношения:

$$G_j^- - G_{j-1}^+ = \tau_j'; \quad j = \overline{2, n}. \quad (1.14)$$

В расчетной схеме, используемой в программе, часть независимых параметров является строго заданными величинами, а значения других варьируют в процессе решения задачи оптимизации. К неизменным независимым переменным относятся внешние параметры  $T_{0j}$ ,  $K_{0j}$  ( $j = \overline{1, n}$ ),  $K$ ,  $K_p$ ,  $K'$  и внутренние конструкционные параметры  $n$ ,  $p$ ,  $N_1$ ,  $N_2$ , ...,  $N_n$ . К варьируемым – потоки отбора тяжелой фракции ступеней  $G_2^-$ ,  $G_3^-$ , ...,  $G_n^-$ .

Поток тяжелой фракции каскада  $T'$  является переменной, отвечающей за «сшивку» концентраций в потоке отбора легкой фракции каскада. При его правильном выборе концентрация  $C_n^+$ , рассчитанная по (1.11), должна совпадать с заданным значением  $K$ .

В случае оптимизации каскада с двумя питаниями поток дополнительного питания не является строго заданной величиной. Его значение варьируют в соответствии с условием получения максимума разделительной способности каскада. С использованием заданных независимых параметров в программе рассчитывают остальные параметры. Для этого из уравнения (1.13) находят транзитные потоки, а из уравнений (1.10) и (1.14) – неизвестные потоки ступеней. Далее, согласно уравнениям (1.7)–(1.9), вычисляют полные коэффициенты разделения. После чего по формулам (1.10)–(1.12) производят расчет концентраций ступеней.

После определения основных параметров ступеней рассчитывают характеристики эффективности разделения и давления в трассах тяжелой фракции и питания ступеней.

Расчет давлений в трассах тяжелой фракции и питания ступеней проводят по формулам:

$$P_{Tj} = \sqrt{\frac{b_0 G_j - G_j^-}{b_1 N_j}}, \quad (1.15)$$

где  $b_0, b_1$  – модельные коэффициенты гидравлической характеристики ГЦ по трассе отвала;

$$P_{0j} = k_0 G_j - k_1, \quad (1.16)$$

где  $k_0, k_1$  – модельные коэффициенты гидравлической характеристики ГЦ по трассе питания [3–6].

## 1.2. Критерии и параметры оптимизации

Целевой функцией оптимизации является максимум разделительной способности каскада, определяемый как

$$E = TV(K) + T'V(K') - T_p V(K_p) - \sum_{i \neq p} \delta_i T_i V(K_i), \quad (1.17)$$

где  $V(x)$  – потенциал разделения, равный

$$V(x) = (2x - 1) \ln \frac{x}{1 - x}, \quad (1.18)$$

где  $\delta_i = 1$  при наличии дополнительного потока питания в ступень  $i$ , без него –  $\delta_i = 0$ .

При выполнении уравнений баланса (1.1) и (1.2) два внешних параметра являются зависимыми. Поэтому в случае трехпоточного каскада

при заданных концентрациях  $K$ ,  $K_p$  и  $K'$  условию максимума  $E$  отвечает максимум потока тяжелой фракции каскада  $T'$ . Его максимальное значение находят численным перебором с проверкой условия  $C_n^+ = K$ . Если в каскаде ГЦ имеется дополнительный поток (потоки) питания, то эту процедуру выполняют при заданном потоке (потоках) и его (их) концентрации.

Оптимальное значение  $T'$  соответствует такому выбору потоков  $G_2^-$ ,  $G_3^-$ , ...,  $G_n^-$ , при котором концентрация легкой фракции последней ступени каскада максимальна и в то же время удовлетворяет условию  $C_n^+ = K$ . В связи с этим в программе расчета реализована следующая вычислительная процедура: при каждом выбранном значении  $T'$  методом Хука–Дживса [2] находят значения  $G_2^-$ ,  $G_3^-$ , ...,  $G_n^-$ , обеспечивающие максимум концентрации легкой фракции последней ступени каскада. Изменением потока отбора тяжелой фракции каскада в заданном интервале достигают выполнения условия «сшивки» рассчитываемой концентрации отбора легкой фракции последней ступени  $C_n^+$  с величиной концентрации отбора легкой фракции каскада  $K$ . Наибольшее значение  $T'$ , при котором выполняется это условие, отвечает максимуму разделительной способности каскада.

В случае оптимизации дополнительного потока питания на указанную процедуру накладывают внешний цикл изменения его величины. Значение дополнительного потока питания находят исходя из общего условия  $E \rightarrow \max$  [3–6].

### 1.3. Оптимизация потока отбора тяжелой фракции каскада

Оптимальное значение  $T'$  выбирают из заданного интервала неопределенности.

Начальное значение  $T'$  находят путем выбора одинакового значения коэффициента деления потока для всех ступеней, обеспечивающего выполнение условия  $C_n^+ = K$ . Исключением является последняя ступень, для которой коэффициент деления потока рассчитывают по найденному потоку  $G_n^- = G_{n-1}$  и заданной величине  $G_n^+ = T$ .

Верхняя граница  $T'_B$  для неизвестного потока отбора тяжелой фракции каскада рассчитывают из условия

$$E = E_{\max} = e_{0\max} \sum_{j=1}^n N_j, \quad (1.19)$$

где  $e_{0\max}$  – максимальная разделительная способность одной ГЦ, определяемая из выражения

$$e_0 = \frac{1}{2} g \theta (1 - \theta) \ln^2(\chi) \rightarrow \max \quad (1.20)$$

при оптимальных значениях  $g_{\text{опт}}$  и  $\theta_{\text{опт}}$ .

Отсюда следует, что

$$T'_B = \frac{E_{\max} - \beta}{\alpha}, \quad (1.21)$$

где величины  $\alpha$  и  $\beta$  равны:

$$\alpha = \frac{(K_p - K')V(K) - (K - K')V(K_p)}{K - K_p} + V(K'); \quad (1.22)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i \neq p} \delta_i T_{0i} (K - K_{oi}) V(K_{oi}) - \sum_{i \neq p} \delta_i T_p (K_p - K_{oi}) V(K)}{K - K_p} - \sum_{i \neq p} \delta_i T_{0i} V(K_{oi}). \quad (1.23)$$

Нижняя граница потока отбора тяжелой фракции каскада из физических соображений принимают равной нулю:

$$T'_H = 0. \quad (1.24)$$

#### 1.4. Оптимизация дополнительного потока питания каскада

Оптимизация величины потока  $T_{0j}$  одного дополнительного питания каскада с известной концентрацией  $K_{0j}$  проводят в заданном интервале неопределенности [3–6].

Верхнюю границу  $T_{0j}$  рассчитывают из условия отсутствия основного питания. Ее величину определяют по значению оптимального потока питания ГЦ  $g_{\text{опт}}$ , соответствующего  $E_{\max}$ :

$$T_{0jB} = g_{\text{опт}} \sum_{i=1}^n N_i. \quad (1.25)$$

Нижнюю границу из физических соображений принимают равной нулю:

$$T_{0jH} = 0. \quad (1.26)$$

#### 1.5. Подбор количества ступеней и точки подачи питания

При автоматическом подборе  $n$  и  $p$  в качестве начального приближения используют количество ступеней и точку подачи питания, соответствующие идеальному каскаду при тех же внешних параметрах. После этого перебором находят такие значения  $n$  и  $p$ , при которых коэффициент использования разделительной мощности будет максимальным.

Автоматический подбор доступен при выборе в программе задачи второго типа (тип задач: № 2) [3–6].



## 1.6. Подбор количества ГЦ в ступени

Оптимизация профиля каскада при постоянном общем количестве ГЦ происходит следующим образом: каждая ступень прямоугольного каскада, начиная со ступени отбора легкой фракции, разделяется на две до тех пор, пока не будет найден профиль, соответствующий максимуму  $K_{\text{им}}$ , либо не будет достигнута точка подачи питания. После этого подобные операции продельывают с регенеративной частью каскада. Ступень отбора легкой фракции допускается разделять дважды.

Оптимизация доступна при выборе в программе задачи второго типа (тип задач: № 2) [3–7].

## 1.7. Оптимизация потоков закрутки

Потоки закрутки могут быть на последней и первой ступени каскада. В случае, когда поток закрутки находится на последней ступени каскада, часть потока отбора легкой фракции этой ступени подается на ее питание, а для первой ступени каскада эту роль выполняет часть потока отбора тяжелой фракции первой ступени.

Расчет потоков закруток производят исходя из условия обеспечения максимума полного коэффициента разделения, соответствующего максимуму разделительной способности каскада. Оптимальный коэффициент деления потока тяжелой фракции и величина потока закрутки первой ступени находят по формулам:

$$\theta_{\text{зотв}} = \frac{1}{4} \frac{a_1}{a_2} + \sqrt{\frac{1}{16} \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^2 + \frac{a_3}{2a_2}}; \quad (1.27)$$

$$T_{\text{зотв}} = (1 - \theta_{\text{зотв}}) G_2^- - T'. \quad (1.28)$$

Соответствующие величины последней ступени равны:

$$\theta_{\text{зотб}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{a_1}{2a_2} \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \left( 1 + \frac{a_1}{2a_2} \right)^2 - \frac{a_1 - a_3}{2a_2}}; \quad (1.29)$$

$$T_{\text{зотб}} = \frac{\theta_{\text{зотб}}}{1 - \theta_{\text{зотб}}} G_n^- - T. \quad (1.30)$$

При оптимизации потоков закрутки вводят минимальный поток закрутки. Если рассчитанный поток закрутки меньше заданного минимума  $G_{3 \text{ min}}$ , то его величина приравнивается к  $G_{3 \text{ min}}$ . В случае, когда модельные коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  разделительной характеристики равны нулю, величины потоков закрутки приравнивают  $G_{3 \text{ min}}$ .

## 1.8. Расчет характеристик эффективности разделения ступеней

После определения основных оптимальных параметров каскада рассчитывают характеристики эффективности разделения ступеней ( $j = \overline{1, n}$ ):

- Фактическая разделительная способность

$$E_{\text{факт } j} = G_j^+ V(C_j^+) + G_j^- V(C_j^-) - G_j V(C_j), \quad (1.31)$$

где  $G_j$ ,  $C_j$  – полный поток и средневзвешенная концентрация питания  $j$ -й ступени, определяемые по соответствующим величинам отдельных питаний  $G_{jl}$  и  $C_{jl}$ , т. е. [3–6]:

$$G_j = \sum_l G_{jl}; \quad C_j = \sum_l G_{jl} C_{jl} / G_j. \quad (1.32)$$

- Эффективная разделительная способность

$$E_{\text{эфф } j} = \sum_l G_{jl} V(C_{jl}). \quad (1.33)$$

- Схемный КПД

$$\eta_{\text{сх } j} = \frac{E_{\text{эфф } j}}{E_{\text{факт } j}}. \quad (1.34)$$

- Разделительная способность одной ГЦ

$$E_{\text{гц } j} = \frac{E_{\text{факт } j}}{N_j}. \quad (1.35)$$

- Гидравлический КПД

$$\eta_{\text{г } j} = \frac{E_{\text{факт } j}}{e_{0\text{max}} N_j}. \quad (1.36)$$

## 1.9. Расчет характеристик эффективности разделения каскада

Для каскада рассчитывают аналогичные характеристики эффективности [3–6]:

- Фактическая суммарная разделительная способность

$$E_{\text{факт}} = \sum_{j=1}^n E_{\text{факт } j}. \quad (1.37)$$

- Эффективная суммарная разделительная способность

$$E_{\text{эфф}} = \sum_{j=1}^n E_{\text{эфф } j} = \sum_{j=1}^n \delta_j T_j V(K_j). \quad (1.38)$$

- Схемный КПД

$$\eta_{\text{сх}} = E_{\text{эфф}} / E_{\text{факт}}. \quad (1.39)$$

- Коэффициент использования разделительной мощности

$$K_{\text{им}} = E_{\text{эфф}} / E_{\text{max}}. \quad (1.40)$$

## 2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

### 2.1. Требования к системе

Для корректной работы программа «Каскад газовых центрифуг» требует наличия операционной системы семейства Microsoft Windows версии 98 и выше, процессор типа Pentium и лучше, оперативной памяти от 64 Мбайт и более, 1 Мбайт свободного пространства на жестком диске и монитор с разрешением  $800 \times 600$  точек. Рекомендуется: Microsoft Windows 2000 (SP 4) или XP (SP 1), процессор Pentium III с частотой от 1 МГц, 128 Мбайт оперативной памяти и монитор с разрешением  $1024 \times 768$  точек.

### 2.2. Особенности интерфейса

Программа включает исполняемый файл «Cascade.exe». Кроме того, в папке программы находится файл помощи «Help\_cascade.hlp» и директория «Save», которая создана для хранения в ней файлов с результатами расчетов.

Главное окно программы с основными параметрами каскада приведено на рис. 2.1. Из основного окна можно переключиться на вкладку «Настройки» (рис. 2.2), обеспечивающую задание дополнительных параметров каскада.

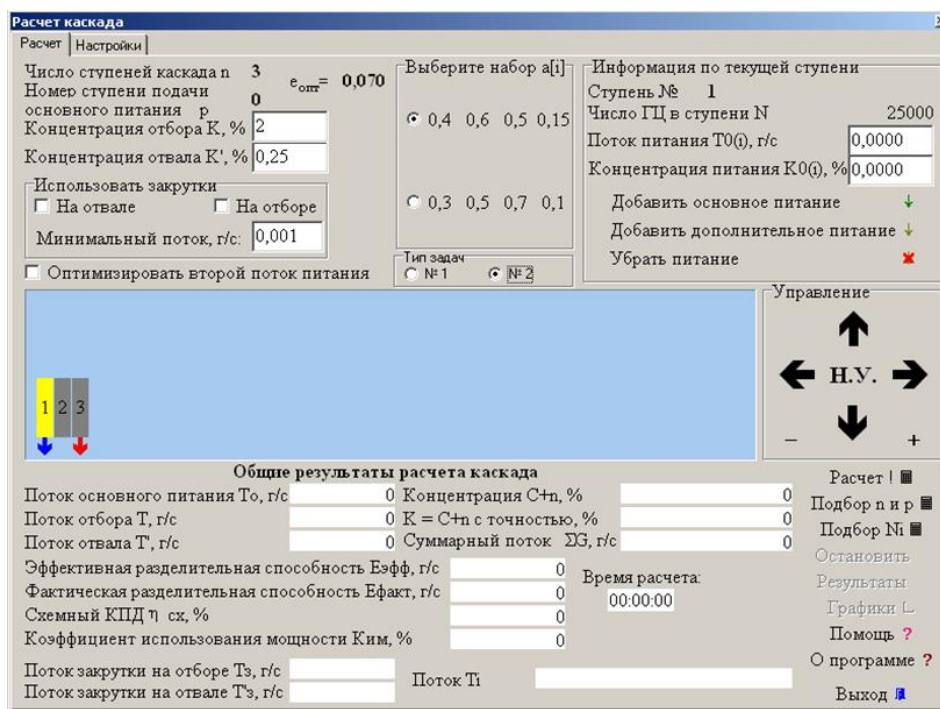


Рис. 2.1. Окно основных параметров каскада

По окончании расчета результаты оптимизации по каждой ступени можно просмотреть в виде уменьшенной (рис. 2.3) или развернутой (рис. 2.4) таблицы, а также в графическом виде (рис. 2.5).

Расчет каскада

Расчет | Настройки

Ограничения по давлению

☐ Использовать

$P_0$ , мм.рт.ст.  $\leq$  300

$P_T$ , мм.рт.ст.  $\geq$  10

$P_T$ , мм.рт.ст.  $\leq$  300

$$P_T = \sqrt{\frac{b[0] \cdot G_i - G_i}{b[1] \cdot N_i}}$$

Набор  $b[i]$

☐ 0,8 ☐ 0,004 ☐ 0,9 ☐ 0,003

$P_0 = k[0] \cdot G_i + k[1]$

Набор  $k[i]$

$k[0] = 0,01$   $k[1] = 1$

Точность расчета

$C_n^+ - K \leq 10$

При оптимизации второго потока питания  $dT \leq 10$

Количество ГЦ в ступени

Максимум: 50000

Дискретность: 5000

Задать

Приоритет программы

Низкий Средний Высокий

Звук по окончании расчета

☒ Воспроизводить

Концентрация по умолчанию

Если не задана концентрация основного питания, по нажатию кнопки "Добавить основное питание" добавлять питание со следующей концентрацией(%): 0,711

Помощь ?

О программе ?

Выход

Рис. 2.2. Окно дополнительных параметров и настроек программы

Результаты расчета в виде таблиц

	C, %	C+, %	C-, %	G-, т/с	G+, т/с	G, т/с	g, т/с	$\theta$	$\chi$	To, т/с	Ko, %
1	0.2500	0.3470	0.3065	194.72	272.19	466.91	18.68	0.5830	1.389		
2	0.3065	0.3968	0.3533	466.91	502.48	969.39	38.78	0.5183	1.296		
3	0.3558	0.4449	0.3997	697.20	675.48	1372.70	54.91	0.4921	1.252		
4	0.4013	0.4919	0.4448	870.20	805.11	1675.30	67.01	0.4806	1.227		
5	0.4448	0.5380	0.4891	999.83	905.84	1905.70	76.23	0.4753	1.211		
6	0.4871	0.5838	0.5328	1100.60	987.58	2088.10	83.53	0.4729	1.200		
7	0.5288	0.6294	0.5763	1182.30	1057.10	2239.40	89.57	0.4720	1.191		
8	0.5704	0.6749	0.6197	1251.80	1120.10	2371.90	94.88	0.4722	1.185		
9	0.6120	0.7204	0.6634	1314.80	1185.60	2500.40	100.02	0.4741	1.178		
10	0.6540	0.7653	0.7074	1380.30	1273.50	2653.80	106.15	0.4799	1.172	264.36	0.7110
11	0.6939	0.8227	0.7560	1203.90	1120.30	2324.20	92.97	0.4820	1.187		
12	0.7447	0.8954	0.8169	1050.70	966.28	2016.90	80.68	0.4791	1.204		
13	0.8096	0.9897	0.8946	896.64	802.53	1699.20	67.97	0.4723	1.225		
14	0.8937	1.1163	0.9962	732.89	625.49	1358.40	54.34	0.4605	1.252		
15	1.0056	1.2941	1.1323	555.85	435.40	991.25	39.65	0.4392	1.291		
16	1.1597	1.5604	1.3188	365.76	240.75	606.51	24.26	0.3969	1.351		
17	1.3814	2.0000	1.5604	171.11	69.64	240.75	9.63	0.2893	1.457		

Выход | Сохранить в файле | Больше >>

Рис. 2.3. Таблица результатов расчета каскада в уменьшенном варианте

Результаты расчета в виде таблиц

	C-, %	C+, %	G-, r/c	G+, r/c	G, r/c	g, m/c	И	ч	To, r/c	Ko, %	Eeff, r/c	Efakt, r/c	Eru, r/c	зсх, %	зr, %	Pt, mm	Po, mm
1	0.2500	0.3470	194.72	272.19	466.91	18.68	0.5830	1.389			6.002	6.002	0.240	100.000	68.696	42.29	2.95
2	0.3065	0.3968	466.91	502.48	969.39	38.78	0.5183	1.296			8.011	8.073	0.323	99.233	92.396	55.55	5.67
3	0.3558	0.4449	697.20	675.48	1372.70	54.91	0.4921	1.252			8.610	8.631	0.345	99.765	98.776	63.32	7.97
4	0.4013	0.4919	870.20	805.11	1675.30	67.01	0.4806	1.227			8.737	8.737	0.349	100.000	99.998	68.56	9.70
5	0.4448	0.5380	999.83	905.84	1905.70	76.23	0.4753	1.211			8.690	8.712	0.348	99.742	99.713	72.44	11.00
6	0.4871	0.5838	1100.60	987.58	2088.10	83.53	0.4729	1.200			8.571	8.648	0.346	99.106	98.978	75.50	12.01
7	0.5288	0.6294	1182.30	1057.10	2239.40	89.57	0.4720	1.191			8.421	8.573	0.343	98.235	98.112	78.05	12.82
8	0.5704	0.6749	1251.80	1120.10	2371.90	94.88	0.4722	1.185			8.261	8.494	0.340	97.254	97.213	80.36	13.52
9	0.6120	0.7204	1314.80	1185.60	2500.40	100.02	0.4741	1.178			8.101	8.412	0.336	96.308	96.270	82.79	14.15
10	0.6540	0.7653	1380.30	1273.50	2653.80	106.15	0.4799	1.172	264.36	0.7110	7.881	8.309	0.332	94.851	95.097	86.18	14.80
11	0.6939	0.8227	1203.90	1120.30	2324.20	92.97	0.4820	1.187			8.335	8.552	0.342	97.456	97.879	80.96	13.04
12	0.7447	0.8954	1050.70	966.28	2016.90	80.68	0.4791	1.204			8.626	8.692	0.348	99.240	99.480	75.03	11.51
13	0.8096	0.9897	896.64	802.53	1699.20	67.97	0.4723	1.225			8.718	8.719	0.349	99.992	99.784	68.02	9.97
14	0.8937	1.1163	732.89	625.49	1358.40	54.34	0.4605	1.252			8.509	8.552	0.342	99.500	97.873	59.48	8.33
15	1.0056	1.2941	555.85	435.40	991.25	39.65	0.4392	1.291			7.835	8.007	0.320	97.849	91.637	48.70	6.56
16	1.1597	1.5604	365.76	240.75	606.51	24.26	0.3969	1.351			6.407	6.678	0.267	95.934	76.434	34.56	4.66
17	1.3814	2.0000	171.11	69.64	240.75	9.63	0.2893	1.457			3.672	3.672	0.147	100.000	42.028	14.66	2.71

Выход Сохранить в файле Меню <<

Рис. 2.4. Таблица результатов расчета каскада в развернутом виде

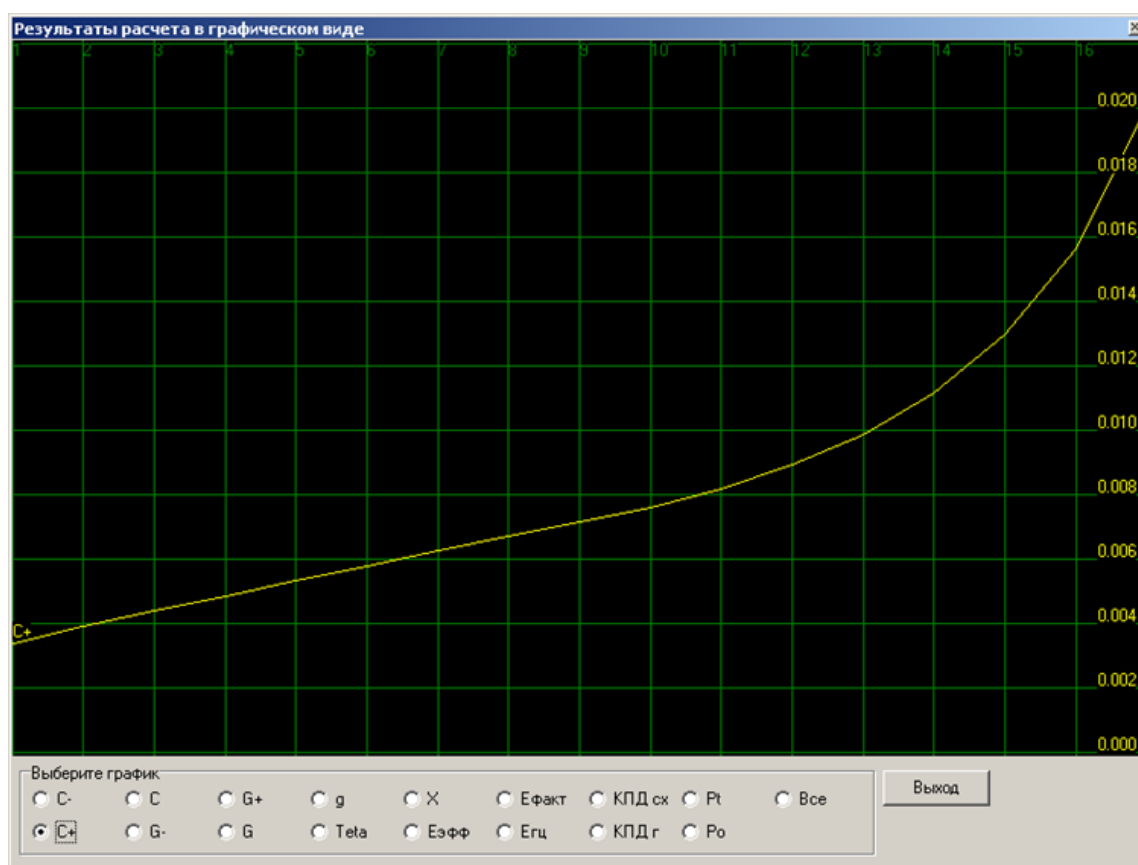






Рис. 2.5. Окно графического отображения результатов расчета каскада



В программе предусмотрено два типа задач для обучения. Для задач каждого типа установлен свой набор модельных коэффициентов раздельной характеристики ГЦ, также в режиме второго типа задач доступны автоматический подбор оптимального количества ступеней в каскаде и номера ступеней питания, оптимизация количества ГЦ в ступенях [7].

### 2.3. Ввод основных параметров каскада

Ввод основных параметров рассчитываемого каскада (рис. 2.1) осуществляется в следующей последовательности [7]:

1. Изменение количества ступеней. Путем нажатия кнопки  на панели «Управление» в правой части формы текущее количество ступеней может быть увеличено, а с помощью кнопки  – уменьшено до требуемого значения в пределах от 3 до 40 ступеней.

2. Изменение количества ГЦ в ступени. Количество ГЦ в ступени увеличивается при нажатии стрелки  на панели «Управление» и уменьшается при нажатии стрелки . Минимальное количество ГЦ в ступени составляет 5000, максимальное – 50 000.

3. Переход по ступеням. Стрелки  и  панели «Управление» позволяют изменять положение текущей (желтой) ступени в каскаде. В правом верхнем углу формы отображается информация, касающаяся текущей ступени.

4. Выбор типа решаемой задачи. Выбор типа решаемых задач осуществляется в поле «Тип задач» над мнемосхемой. Для каждого типа задач предусмотрены свои наборы модельных коэффициентов раздельной характеристики ГЦ. Задачи второго типа предусматривают подбор  $n$  и  $p$ , а также оптимизацию профиля каскада при постоянном количестве ГЦ.

5. Выбор набора модельных коэффициентов раздельной характеристики ГЦ. Модельную характеристику ГЦ выбирают из списка на соответствующей панели сверху, в средней части формы. Список состоит из семи наборов.

6. Ввод концентраций отбора легкой и тяжелой фракций (отбора и отвала) каскада. Величины  $K$  и  $K'$  вводят в соответствующих полях слева сверху формы. Все концентрации должны находиться в интервале от 0 до 100 %.

7. Задание основного потока питания. Для задания основного потока питания в текущую ступень необходимо ввести его концентрацию в поле «Концентрация питания  $K(0)_i$ , %» панели «Информация по текущей ступени» и нажать кнопку «Добавить основное питание». В случае успешного задания основного потока питания над текущей ступенью на мнемосхеме появится стрелка зеленого цвета.

8. Задание дополнительного потока питания. Для задания дополнительного потока питания в текущую ступень необходимо ввести его концентрацию в поле «Концентрация питания  $K(0)_i$ , %», поток – в поле «Поток питания ступени, г/с». После чего нажать кнопку «Добавить дополнительное питание». В случае успешного задания дополнительного потока питания над текущей ступенью на мнемосхеме появится стрелка коричневого цвета. Все вводимые в программе величины потоков должны быть положительными.

Изменения параметров каскада отражаются на мнемосхеме (голубая панель). Перед началом расчета необходимо задать ступень подачи основного питания [7].

## **2.4. Ввод дополнительных параметров расчета каскада**

Дополнительные параметры для расчета каскада вводят на вкладке «Настройки» (рис. 2.2) главного окна программы:

1. Включение ограничений по давлению. Ограничения по давлению включают выбором пункта «Использовать» на панели «Ограничения по давлению».

2. Ввод ограничений по давлению. В полях « $P_0 \leq$ », « $P_T \leq$ » и « $P_T \geq$ » вводят ограничения на давления в трассах питания и отбора тяжелой фракции (отвала) каскада. Ограничения по давлению должны быть обязательно положительными и не превышать  $10^{36}$  мм рт. ст.

3. Выбор набора модельных коэффициентов гидравлической характеристики ГЦ по трассе отбора тяжелой фракции (отвала) каскада. Набор  $b_i$  выбирают указанием одного из двух пунктов на соответствующей панели.

4. Выбор набора модельных коэффициентов гидравлической характеристики ГЦ по трассе питания. Коэффициенты  $k_i$  вводятся в соответствующих полях.

5. Точность расчета. Для изменения точности расчета по концентрации ( $\varepsilon_c$ ) и по дополнительному потоку питания ( $\varepsilon_T$ ) необходимо ввести требуемую величину в полях прокрутки панели «Точность расчета». Точность расчета  $\varepsilon_c$  может изменяться от  $10^{-2}$  до  $10^{-16}$ , а  $\varepsilon_T$  – от  $10^2$  до  $10^{-16}$  [7].

## **2.5. Особенности ввода данных**

Десятичная запятая во время ввода дробных чисел выглядит « $\square,$ ». Ввод « $\square.$ » недопустим.

При попытке ввести некорректные данные программа выдает сообщение о типе ошибки. В некоторых случаях (например, при вводе числа ступеней) программа защищена от некорректного ввода.

Чтобы ввести ограничение по давлению в формате « $10^x$ », необходимо использовать следующий формат записи: «1EX». Например, для ввода числа  $1,2 \cdot 10^3$  необходимо в поле ввода написать 1,2E3.

## 2.6. Расчет каскада

Расчет каскада необходимо производить в следующем порядке:

1. Введение потоков закрутки. Для того чтобы включить в расчет каскада потоки закрутки на ступенях отбора тяжелой и легкой фракций каскада (отвале и отборе), необходимо пометить нужный пункт на панели «Использовать закрутки», после чего ввести минимальный поток закрутки в соответствующем поле.

2. Оптимизация дополнительного потока питания. Для включения оптимизации дополнительного потока питания необходимо пометить соответствующий пункт между панелью потоков закрутки и мнемосхемой. Оптимизация будет работать при наличии только одного дополнительного потока питания.

В основном окне присутствуют кнопки начала расчета – «Расчет», прерывания расчета – «Остановка» (работает только во время расчета), вывода результатов в табличном и графическом виде – «Результаты» и «Графики», помощи, вывода общих сведений о программе и выхода. Кнопки «Подбор  $n$  и  $p$ » и «Подбор  $N_i$ » доступны только для второго типа задач. Первая позволяет найти оптимальный по конфигурации каскад из одинакового типа ступеней для заданных внешних концентраций. Вторая – оптимальный по профилю каскад с заданным количеством ГЦ [7].

## 2.7. Настройки программы

В программе есть возможность произвести следующие настройки:

1. Максимальное количество ГЦ в ступени и шаг, с которым оно изменяется. Параметры вводят в полях прокрутки панели «Количество ГЦ в ступени». Для подтверждения изменений необходимо нажать кнопку «Задать». Количество ГЦ в ступени может изменяться от 5000 до 50 000 с шагом от 1000 до 50 000.

2. Выбор приоритета программы. Для изменения приоритета программы необходимо переместить ползунок в соответствующей панели в нужную сторону.

Высокий приоритет программы вызывает эффект «зависания» при работе с другими приложениями Windows и не позволяет остановить расчет, но рассчитывает каскад за минимальное время.

Низкий приоритет позволяет комфортно работать с другими приложениями во время расчета, но время, затраченное на это, будет больше.



Средний приоритет – компромисс, позволяющий сократить время расчета и одновременно работать с другими приложениями. Рекомендуется при обычных расчетах.

3. Концентрация основного потока питания задается по умолчанию. Вводится в соответствующем поле внизу формы [7].

4. Вывод звукового сигнала по окончании расчета. Флажок на панели «Звук по окончании расчета» задает звуковой сигнал после завершения оптимизации каскада.

## **2.8. Просмотр результатов расчета каскада**

Во время работы программы изменение ключевых параметров каскада отображается и обновляется в нижней части главного окна (рис. 2.1). После успешного окончания расчета каскада там же выводятся его основные параметры, а также время, затраченное на расчет.

Для просмотра результатов расчета каскада по ступеням служит кнопка «Результаты», при нажатии которой выводится форма с таблицей. Таблица отображает результаты в уменьшенном виде (рис. 2.3) и при желании может быть развернута нажатием на кнопку «Больше >>» (рис. 2.4). Обратная операция производится нажатием на кнопку «Меньше <<». Кроме того, существует возможность сохранить результаты расчета каскада в файле с расширением «\*.cas». Для этого надо нажать на кнопку «Сохранить в файле» и выбрать место его размещения (по умолчанию – «\ПАПКА ПРОГРАММЫ\Save\»).

Кнопка «Графики» основной формы служит для вывода результатов расчета каскада в графическом виде, что облегчает их восприятие (рис. 2.5). В панели в нижней части формы можно выбрать для просмотра график изменения одного из рассчитанных параметров или все сразу.

Для закрытия форм с таблицей результатов и графиками на них предусмотрена кнопка «Выход» [7].

## **2.9. Работа с результатами расчета каскада**

Для работы с результатами расчета каскада необходимо после расчета нажать на кнопку «Результаты», затем кнопку «Сохранить в файле». После этого нужно открыть сохраненный файл с помощью программы «Блокнот», оттуда копированием перенести выбранные данные в таблицу Excel согласно таблице, которая находится во вкладке «Результаты».

**Обращаем внимание на то, что в файле результатов рассчитанные значения точнее, чем в самой программе, поэтому данные необходимо брать из файла с результатами.**

Пример переноса данных из программы в таблицу Excel представлен на рис. 2.6.

Результаты расчета в виде таблиц

	C-, %	C+, %	C, %	G-, r/c	G+, r/c	G, r/c	g, m/c	Θ	χ	To, r/c	Ko, %	Eeff, r/c	Efakt, r/c	Eru, r/c	ηсх, %	ηг, %	Pt, mm
1	0.2500	0.3952	0.3462	38.69	76.05	114.74	4.59	0.6628	1.583			2.558	2.558	0.102	100.000	29.272	23.04
2	0.3462	0.5079	0.4389	114.74	154.16	268.90	10.76	0.5733	1.469			4.198	4.752	0.190	88.336	54.388	31.68
3	0.4562	0.6599	0.5697	192.85	242.64	435.49	12.44	0.5572	1.450	52.52	0.7110	4.836	7.262	0.207	66.594	59.370	33.33
4	0.5788	0.8114	0.6876	228.81	201.02	429.83	17.19	0.4677	1.405			5.746	6.201	0.248	92.654	70.975	33.92
5	0.7235	1.0403	0.8552	187.19	133.13	320.31	12.81	0.4156	1.443			4.594	5.300	0.212	86.675	60.663	26.28
6	0.9290	1.3993	1.0965	119.29	65.99	185.29	7.41	0.3562	1.513			3.162	3.768	0.151	83.932	43.122	17.01
7	1.2400	2.0000	1.3993	52.16	13.84	65.99	2.64	0.2096	1.625			1.406	1.406	0.056	100.000	16.093	2.52

Выход

Сохранить в файле

Меньше <<

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1											
2											
3		C-	C+	C	G-	G+	G	g	Teta	X	
4	1	0,0025	0,003951898	0,003462379	38,68558358	76,05455511	114,7401387	0,004589606	0,662841757	1,583063467	
5	2	0,003462379	0,005078919	0,004389145	114,7401387	154,1624627	268,9026014	0,010756104	0,573302236	1,469270545	
6	3	0,004561584	0,006598712	0,005696613	192,8480462	242,6430329	435,4910792	0,012442602	0,557171075	1,449549921	
7	4	0,005788361	0,008113538	0,006875797	228,8074596	201,0221769	429,8296365	0,017193185	0,467678726	1,404984621	
8	5	0,007234971	0,010403338	0,008551796	187,1866036	133,1279154	320,314519	0,012812581	0,415616238	1,442527718	
9	6	0,009290313	0,013993155	0,010965335	119,2923421	65,99379925	185,2861413	0,007411446	0,356172344	1,513393153	
10	7	0,012399769	0,02	0,013993155	52,15822591	13,83557334	65,99379925	0,002639752	0,209649596	1,625442075	
11											
12											

Рис. 2.6. Пример переноса некоторых данных из программы в Excel

Далее с данными можно проводить различные действия, например строить графики зависимости величин друг от друга, от номера ступени.

## 2.10. Подготовка к работе

**ВНИМАНИЕ!** Если в процессе расчета программа выдает сообщение типа «0.3 is not a valid floating point value», необходимо в свойствах ОС Windows изменить параметры представления десятичной запятой с «.» на «.» или наоборот (раздел «Язык и региональные стандарты» или «Регион → Дополнительно»).

В правом нижнем углу нажать РУС (RU) → Панель управления → Настройки языка → Регион → Дополнительные параметры даты и времени → Региональные стандарты → Дополнительные параметры → Разделитель целой и дробной части → Вписать точку вместо запятой [7].

### 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### Требования по оформлению отчета

Поля страниц: верхнее и нижнее – 2 см, левое – 3 см, правое – 1,5 см.

Текст, цифры, обозначения физических величин везде (в том числе в таблицах и на графиках) Times New Roman 14. Обозначения физических величин везде пишутся курсивом. После расчетов полный коэффициент разделения следует округлить до третьего знака после запятой, коэффициент деления потока – до второго знака после запятой,  $E_{\text{эфф}}$  и  $E_{\text{факт}}$  – до третьего знака после запятой, схемный КПД каскада и коэффициент использования разделительной мощности каскада перевести в проценты и округлить до второго знака после запятой. Перед рисунками и таблицами в тексте на них обязательно должны быть ссылки. Например: «Исходные данные для расчета приведены в таблице 1. По данным таблицы 2 построена зависимость полного коэффициента разделения от количества газовых центрифуг в ступени подачи основного питания». После заголовка таблиц и подписей под рисунками точка не ставится. Перед таблицами и рисунками отступ делать не нужно, а после таблиц и подписей под рисунками надо нажимать **enter**, чтобы отделить от них основной текст. На рисунках обязательно делать сетку и приводить легенду кривых. Для упрощения процедуры описания результатов и их анализа целесообразно вводить упрощенные обозначения легенд. Например: 1-й тип каскада – без потока закрутки; 2-й тип каскада – с потоком закрутки на ступени отбора легкой фракции; 3-й тип закрутки – с потоком закрутки на ступени отбора тяжелой фракции; 4-й тип каскада – с потоками закрутки на конечных ступенях каскада, тогда при анализе результатов можно писать, для какого именно типа (типов) каскада они получены.

При анализе результатов следует сначала описать ход кривых (как изменяется рассматриваемый параметр: линейно, нелинейно, увеличивается, уменьшается, имеет максимум или минимум), затем указать с какого и до какого значения он меняется и на сколько процентов, привести минимальное или максимальное значение с указанием, на какой ступени как влияет рассматриваемая величина на конкретный параметр (приводит к его увеличению или уменьшению). Ход кривых с максимумом и минимумом описывать не надо, т. к. из понятия максимума следует, что до него рассматриваемый параметр увеличивается, после – уменьшается (соответственно, у минимума все наоборот). Если на кривой наблюдается два пика и они различаются по величине, то в качестве максимума следует указать наибольший. Если величины одинаковы или очень близки, то следует указать в анализе оба пика, приводящие к максимальному

эффекту. Если на графике приведены две зависимости (например,  $E_{\text{эфф}}$  и  $E_{\text{факт}}$ ), то надо сравнить их численные значения на конечных ступенях каскада (на сколько процентов  $E_{\text{факт}} > E_{\text{эфф}}$ ). Схемный КПД и коэффициент использования разделительной мощности каскада сравнивать между собой не нужно, т. к. это совершенно разные величины.

Почти во всех практических заданиях необходимо определить оптимальные условия работы каскада, и на основании них дать рекомендацию, при каком значении изменяемой величины следует эксплуатировать каскад. Поэтому при анализе результатов расчетов особое внимание надо уделить описанию условий, когда рассматриваемый параметр эффективности каскада максимален. Основным критерием оптимизации является максимальное значение  $E_{\text{эфф}}$ , но если наряду с ним максимальны и другие характеристики эффективности работы каскада, их надо тоже перечислить в рекомендации.

В отличие от более подробного описания анализа результатов расчета выводы формулируют более кратко. Начинать их следует с общепринятых фраз:

1. Исследовано влияние такого-то параметра на (далее идет перечисление всех показателей эффективности работы каскада).
2. Определено, что....
3. Показано, что....
4. Установлено, что... (в пунктах 2–4 необходимо кратко описать все исследованные зависимости, не приводя конкретных цифр, как в анализе результатов, а указав только при каких условиях они максимальны).
5. Рекомендовано использовать (указать определенные условия работы каскада), поскольку при них наблюдаются максимальные значения таких-то показателей эффективности.

Если характеристики эффективности каскада максимальны при разных условиях, то в рекомендации указываются те условия, при которых максимальна  $E_{\text{эфф}}$ .

В практическом задании 9 программа автоматически подбирает количество степеней в каскаде, количество газовых центрифуг в ступенях, номер ступени подачи основного питания, при этом изменяется форма каскада. В связи с этим нужно сначала в отчете привести два скриншота программы (до и после подбора параметров) и описать произошедшие изменения в каскаде. В выводах нужно также кратко описать эти изменения без цифр. Рекомендацию в данном случае давать не следует, т. к. программа автоматически подобрала оптимальный вариант каскада.

В практическом задании 10 в выводах необходимо самостоятельно определиться, давать ли рекомендацию оптимального режима работы каскада или нет и объяснить почему.

## Примеры оформления таблиц и графиков

Таблица 3.1

*Исходные данные для расчета*

Количество ступеней	Степень питания	Количество ГЦ в ступени	Концентрация отбора, %	Концентрация отвала, %
8	4	35 000	4	0,1

Таблица 3.2

*Результаты расчета полного коэффициента разделения ступеней при изменении номера ступени подачи дополнительного питания*

$N_d$	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$	$\chi_6$	$\chi_7$	$\chi_8$	$\chi_9$	$\chi_{10}$	$\chi_{11}$	$\chi_{12}$	$\chi_{13}$	$\chi_{14}$
4	1,39	1,297	1,256	1,238	1,231	1,222	1,214	1,235	1,258	1,285	1,319	1,366	1,436	1,547
5	1,391	1,298	1,255	1,232	1,223	1,222	1,216	1,237	1,259	1,286	1,321	1,368	1,438	1,55
6	1,394	1,3	1,256	1,231	1,218	1,213	1,215	1,238	1,261	1,288	1,323	1,37	1,441	1,552
8	1,399	1,304	1,259	1,234	1,218	1,208	1,203	1,225	1,258	1,29	1,326	1,375	1,446	1,558
9	1,401	1,307	1,262	1,236	1,22	1,21	1,203	1,221	1,246	1,287	1,327	1,377	1,449	1,561
10	1,405	1,309	1,264	1,239	1,223	1,212	1,206	1,222	1,241	1,27	1,323	1,377	1,451	1,565

\* $N_d$  – номер ступени подачи дополнительного потока питания.

Таблица 3.3

*Результаты расчета характеристик эффективности каскада при изменении номера ступени подачи дополнительного питания*

Номер ступени подачи дополнительного потока питания	$E_{эфф}$	$E_{факт}$	$\eta_{сх}$	$K_{им}$
4	64,135	83,286	77,005	65,537
5	62,295	83,082	74,981	63,657
6	60,384	82,828	72,903	61,704
8	56,309	82,274	68,441	57,541
9	54,098	82,069	65,917	55,281
10	51,667	81,948	63,048	52,796

Таблица 3.4

*Результаты расчета полного коэффициента разделения ступеней  
для различных вариантов организации потока закрутки*

Тип каскада*	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$
1	2,516	2,185	2,023	2,118	2,387
2	2,507	2,175	2,007	2,09	2,36
3	2,516	2,185	2,023	2,118	2,387
4	2,507	2,175	2,007	2,09	2,36

\*Типы каскадов: 1-й тип – без потоков закрутки; 2-й тип – с потоком закрутки на ступени отбора легкой фракции каскада; 3-й тип – с потоком закрутки на ступени отбора тяжелой фракции каскада; 4-й тип – с двумя потоками закрутки на крайних ступенях каскада.

Таблица 3.5

*Результаты расчета характеристик эффективности каскада  
для различных вариантов реализации потоков закрутки*

Тип каскада*	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\text{факт}}$	$\eta_{\text{сх}}$	$K_{\text{им}}$
1	27,899	32,105	0,869	0,404
2	28,359	35,296	0,803	0,411
3	27,899	32,105	0,869	0,404
4	28,359	35,296	0,803	0,411

\*Типы каскадов: 1-й тип – без потоков закрутки; 2-й тип – с потоком закрутки на ступени отбора легкой фракции каскада; 3-й тип – с потоком закрутки на ступени отбора тяжелой фракции каскада; 4-й тип – с двумя потоками закрутки на крайних ступенях каскада.

Таблица 3.6

*Результаты расчета суммарного потока ступеней, схемного КПД ступеней,  
разделительной способности одной газовой центрифуги  
в каждой ступени каскада для исходного и оптимизированного каскада*

Номер ступени	исходный			оптимизированный		
	$G$	$\eta_{\text{сх}}$	$E_{\text{гц}}$	$G$	$\eta_{\text{сх}}$	$E_{\text{гц}}$
1	41,464	1	0,041	43,617	1	0,059
2	86,776	0,96	0,059	85,896	0,999	0,069
3	120,932	0,963	0,065	116,411	0,998	0,069
4	144,516	0,972	0,067	138,42	0,988	0,067
5	161,078	0,98	0,067	157,869	0,973	0,067

Окончание табл. 3.6

Номер ступени	исходный			оптимизированный		
	$G$	$\eta_{сх}$	$E_{гц}$	$G$	$\eta_{сх}$	$E_{гц}$
6	173,184	0,986	0,068	176,151	0,987	0,068
7	182,144	0,99	0,068	191,381	0,993	0,068
8	188,078	0,994	0,068	203,906	0,997	0,068
9	189,036	0,994	0,067	214,749	0,999	0,068
10	148,794	0,976	0,065	225,875	0,999	0,069
11	110,332	0,945	0,06	242,575	0,956	0,069
12	74,085	0,906	0,052	213,207	1	0,069
13	41,466	0,87	0,039	178,937	0,987	0,068
14	14,666	1	0,015	149,169	0,977	0,067
15				124,696	0,996	0,068
16				100,704	0,999	0,068
17				76,255	0,983	0,065
18				52,021	0,942	0,059
19				30,395	0,982	0,059
20				12,136	1	0,036

Таблица 3.7

*Результаты расчета характеристик эффективности  
исходного и оптимизированного каскадов*

Каскад	$E_{эфф}$	$E_{факт}$	$\eta_{сх}$	$K_{им}$
исходный	27,192	28,076	0,969	0,794
оптимизированный	32,256	32,653	0,988	0,942

Таблица 3.8

*Результаты расчета полного коэффициента разделения ступеней  
при изменении количества ГЦ в ступени подачи потока питания*

$N_f$	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$	$\chi_6$	$\chi_7$	$\chi_8$	$\chi_9$	$\chi_{10}$	$\chi_{11}$	$\chi_{12}$	$\chi_{13}$	$\chi_{14}$
5000	1,422	1,325	1,279	1,253	1,236	1,226	1,093	1,24	1,263	1,29	1,325	1,373	1,443	1,555
10 000	1,413	1,317	1,271	1,246	1,23	1,219	1,165	1,235	1,258	1,285	1,319	1,366	1,436	1,547
15 000	1,408	1,313	1,267	1,242	1,226	1,216	1,21	1,232	1,255	1,282	1,316	1,362	1,432	1,543
20 000	1,405	1,309	1,264	1,239	1,223	1,213	1,243	1,23	1,253	1,279	1,313	1,359	1,428	1,54
25 000	1,402	1,307	1,262	1,237	1,221	1,211	1,269	1,228	1,251	1,278	1,311	1,357	1,426	1,537
30 000	1,399	1,305	1,26	1,235	1,219	1,209	1,291	1,227	1,25	1,276	1,31	1,356	1,424	1,535
35 000	1,397	1,303	1,258	1,233	1,218	1,208	1,309	1,226	1,249	1,275	1,308	1,354	1,422	1,533
40 000	1,396	1,301	1,257	1,232	1,216	1,207	1,326	1,225	1,248	1,274	1,307	1,353	1,421	1,532
45 000	1,394	1,3	1,256	1,231	1,215	1,206	1,34	1,224	1,247	1,273	1,306	1,352	1,42	1,53
50 000	1,393	1,299	1,255	1,23	1,214	1,205	1,353	1,223	1,246	1,272	1,305	1,351	1,418	1,529

\* $N_f$  – количество газовых центрифуг в ступени подачи потока питания.

Таблица 3.9

*Результаты расчета характеристик эффективности каскада при изменении количества ГЦ в ступени подачи потока питания*

$N_f$	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\text{факт}}$	$\eta_{\text{сх}}$	$K_{\text{им}}$
5000	53,915	57,054	0,945	0,771
10 000	58,167	59,931	0,971	0,812
15 000	60,826	62,247	0,977	0,829
20 000	62,793	64,199	0,978	0,836
25 000	64,369	65,9	0,977	0,837
30 000	65,688	67,416	0,974	0,835
35 000	66,828	68,79	0,971	0,831
40 000	67,832	70,049	0,968	0,826
45 000	68,733	71,215	0,965	0,819
50 000	69,549	72,303	0,962	0,812

\* $N_f$  – количество газовых центрифуг в ступени подачи потока питания.

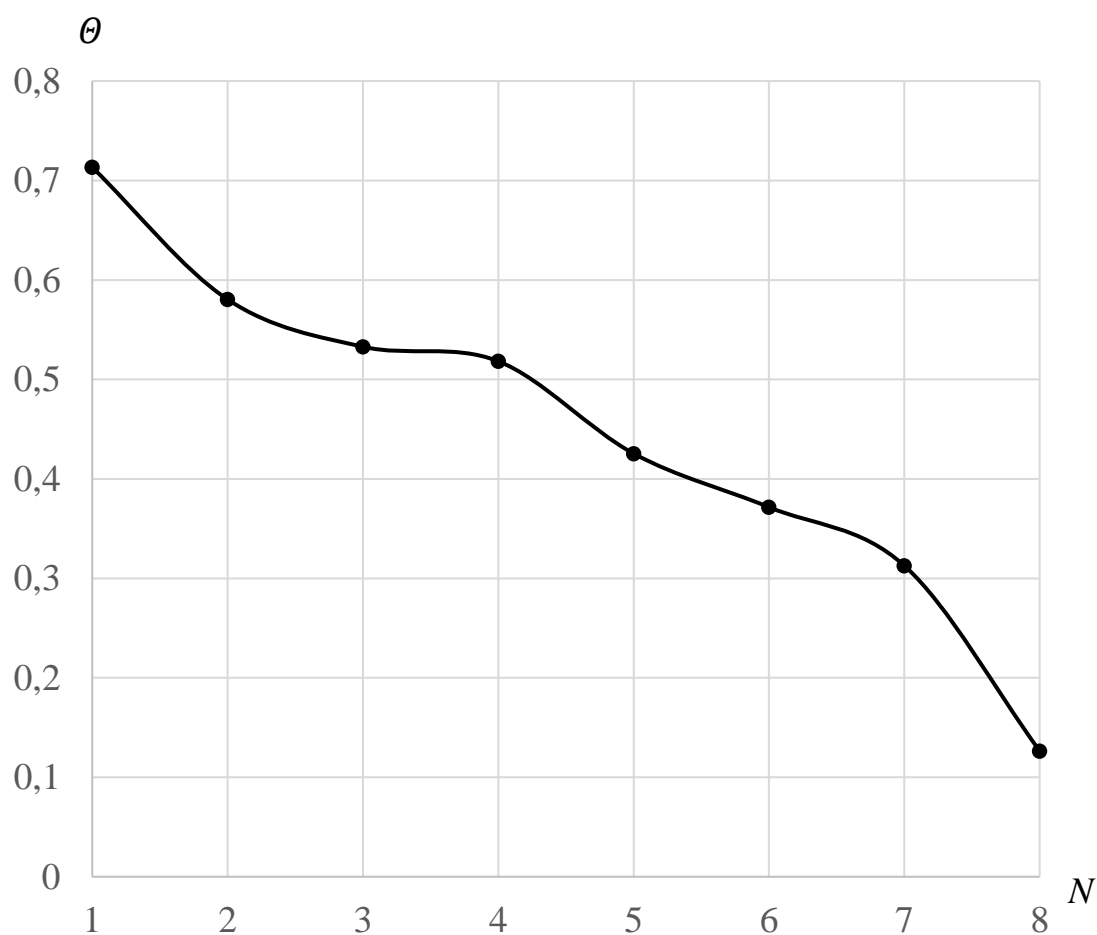


Рис. 3.1. Зависимость коэффициента деления потока от номера ступени



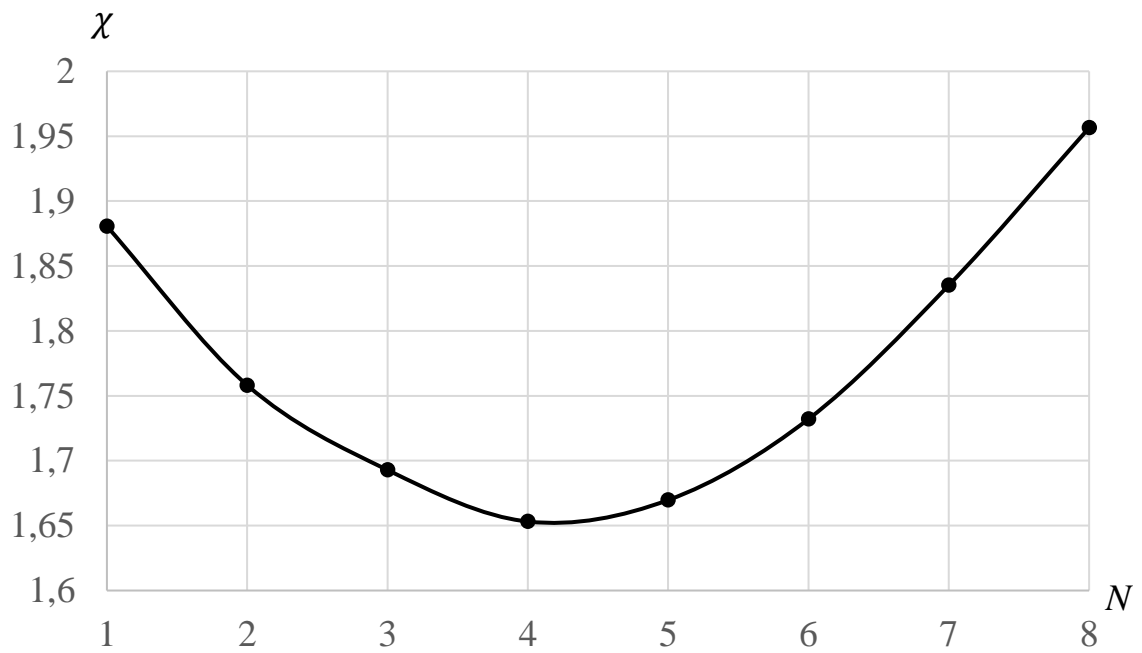


Рис. 3.2. Зависимость полного коэффициента разделения ступени от номера ступени

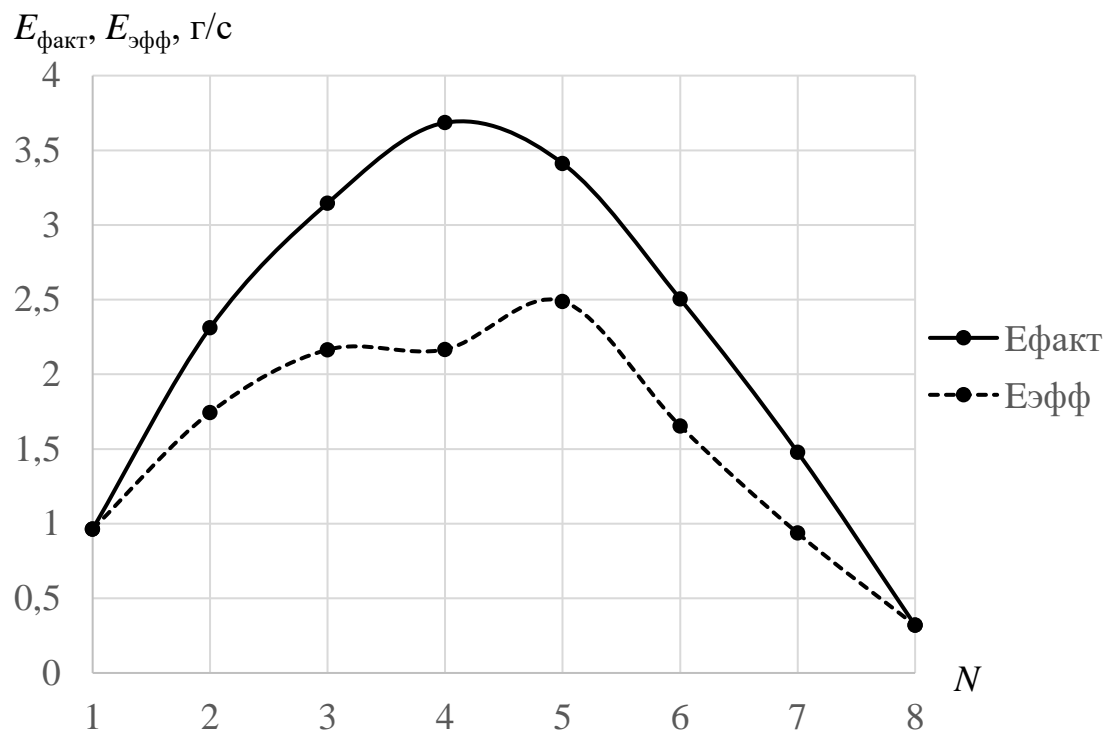


Рис. 3.3. Зависимости фактической и эффективной разделительных способностей ступеней от номера ступени

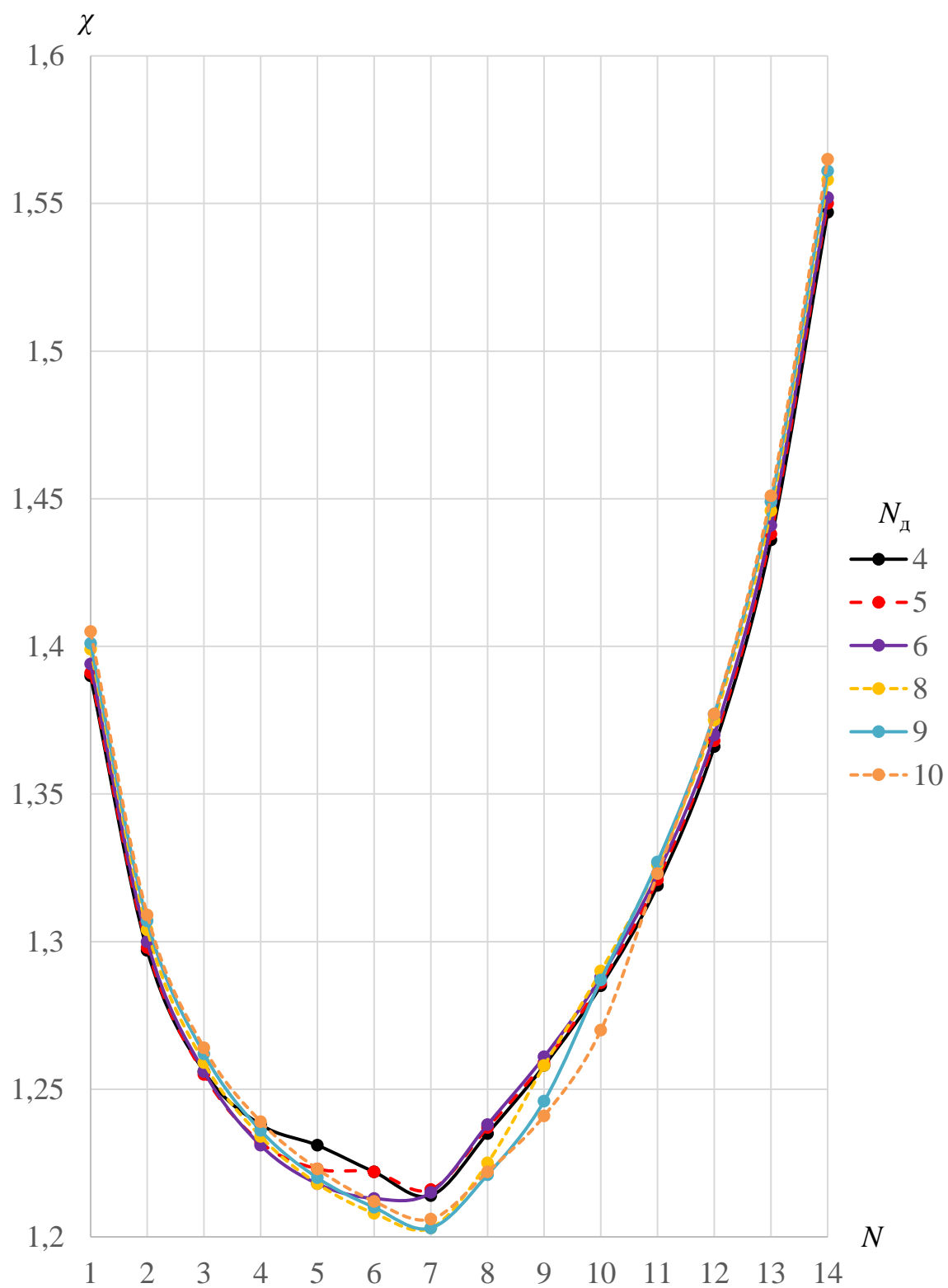


Рис. 3.4. Зависимость полного коэффициента разделения ступени от номера ступени при разных номерах ступени подачи дополнительного питания

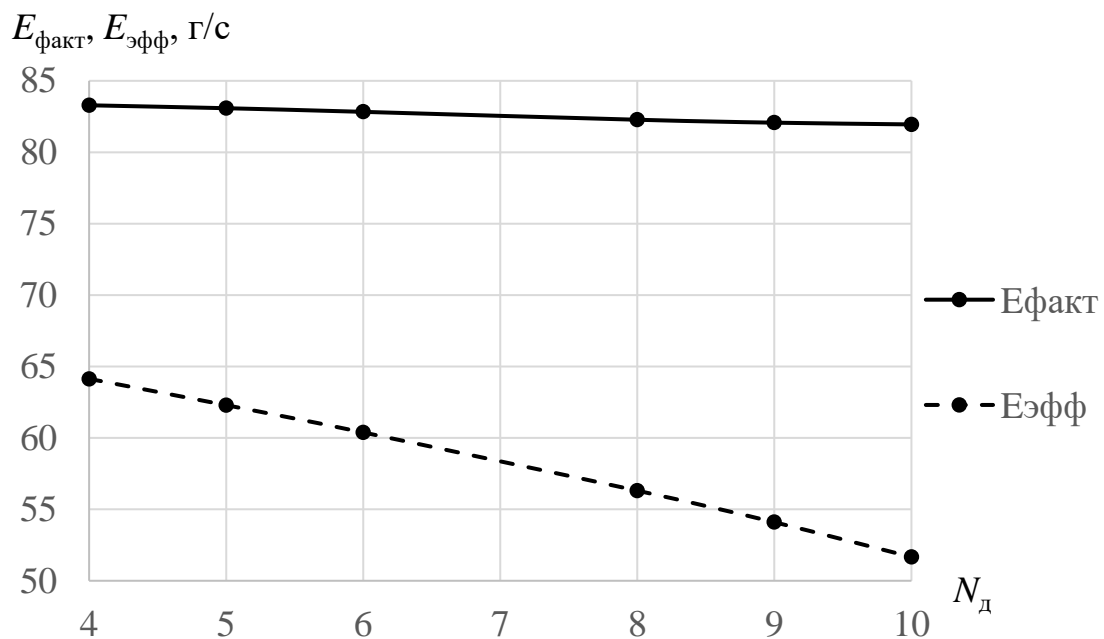


Рис. 3.5. Зависимости фактической и эффективной разделительных способностей ступеней от номера ступени подачи дополнительного питания

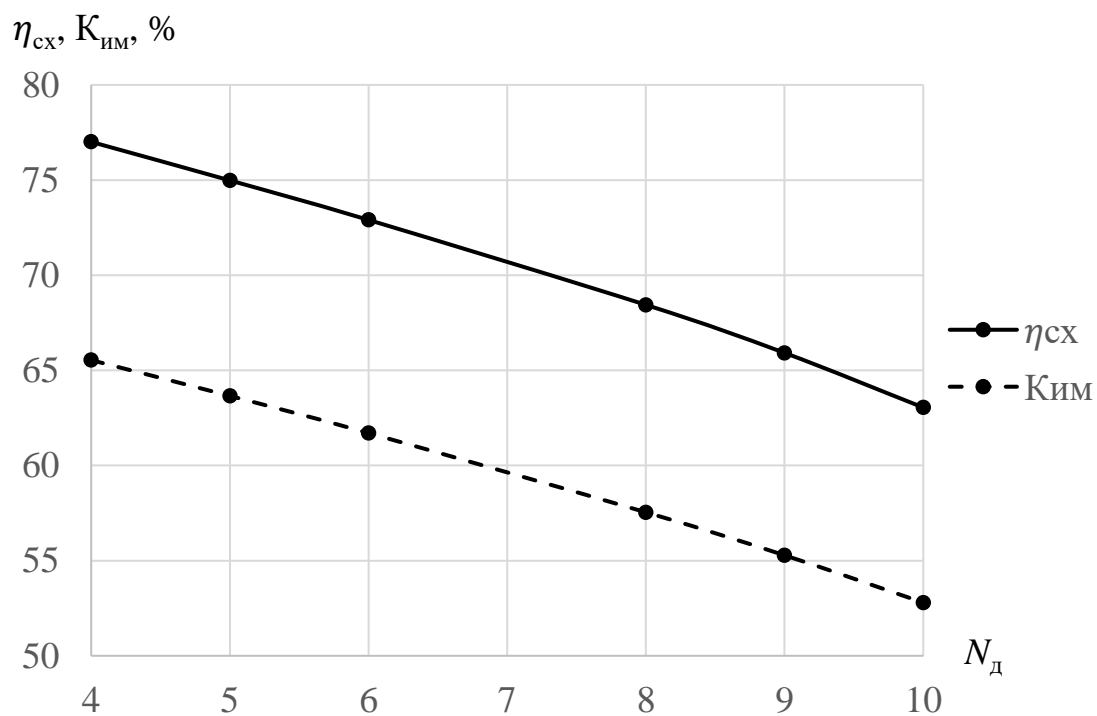
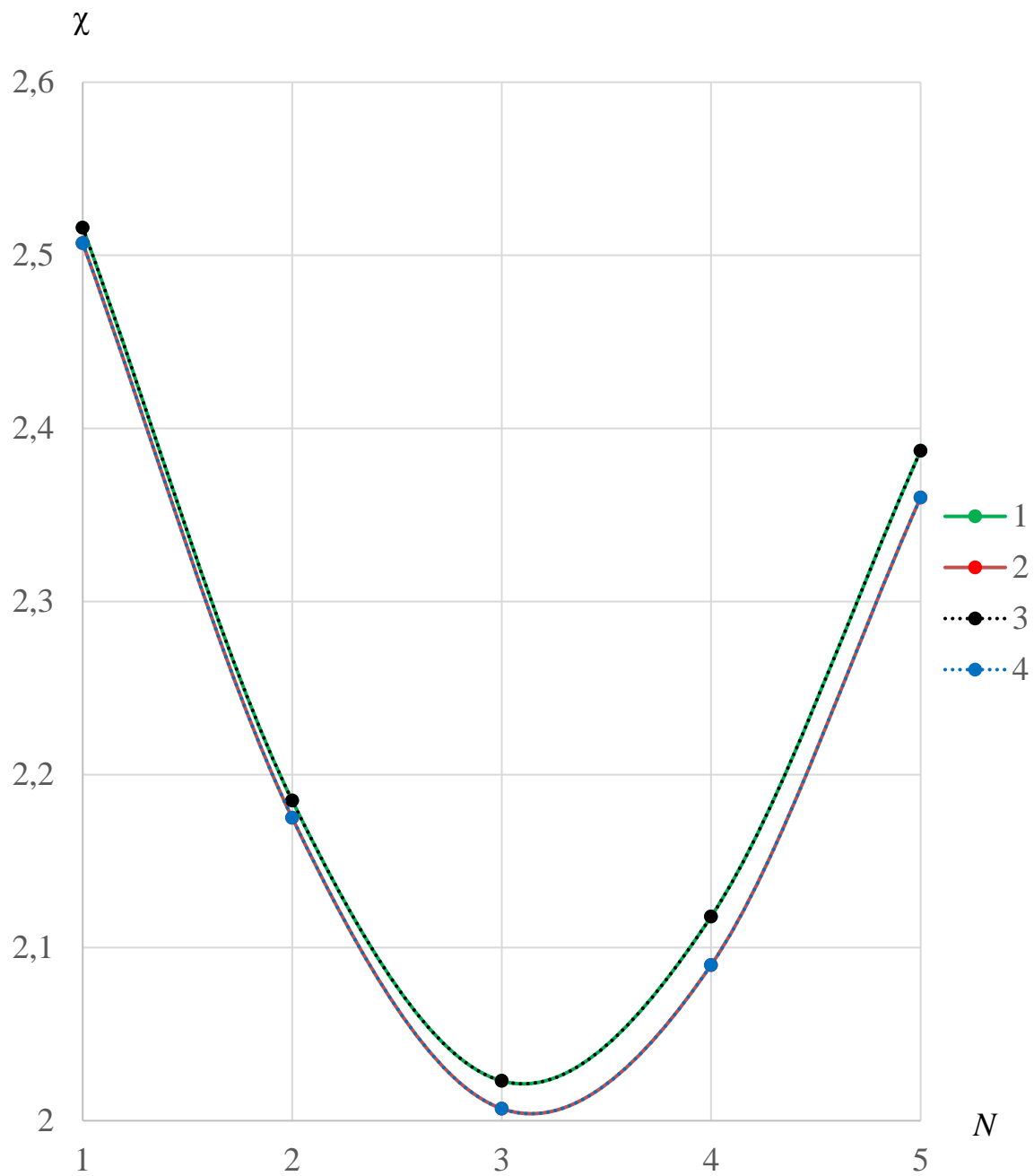


Рис. 3.6. Зависимости схемного КПД и коэффициента использования разделительной мощности каскада от номера ступени подачи дополнительного питания



*Рис. 3.7. Зависимость полного коэффициента разделения ступени от номера ступени каскада для различных вариантов реализации потоков закрутки:*

- 1 – без потоков закрутки;*
- 2 – с потоком закрутки на ступени отбора легкой фракции каскада;*
- 3 – с потоком закрутки на ступени отбора тяжелой фракции каскада;*
- 4 – с двумя потоками закрутки на крайних ступенях каскада*

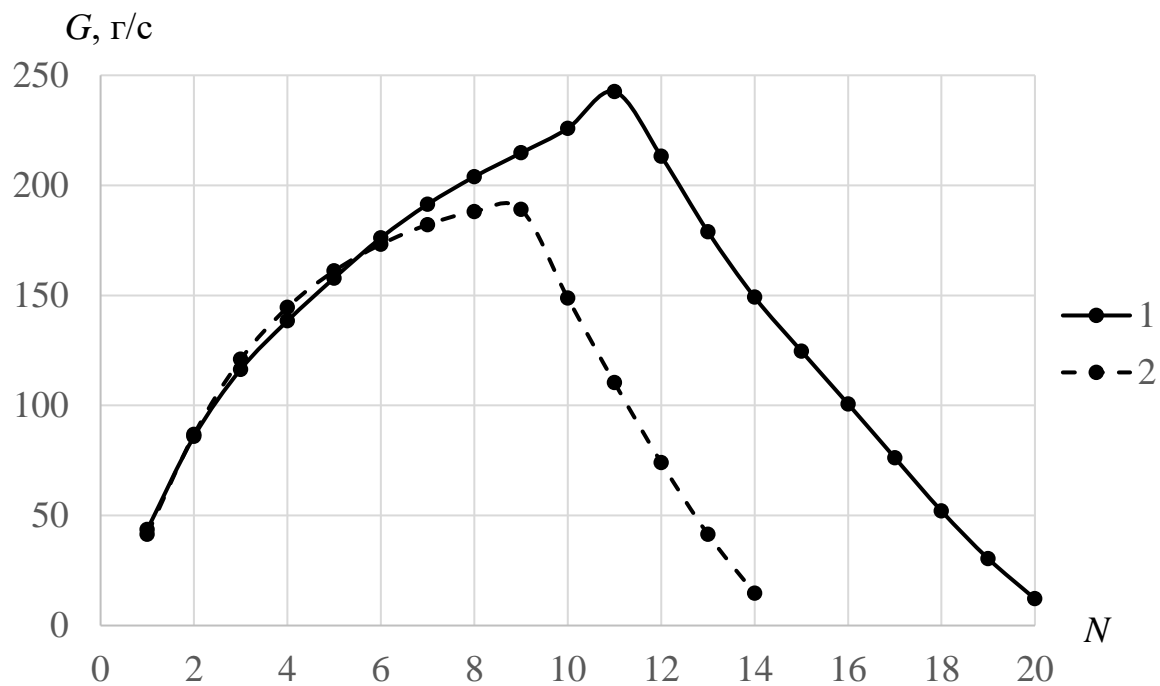


Рис. 3.8. Зависимость суммарного потока ступени от номера ступени:  
1 – оптимизированный каскад; 2 – исходный каскад

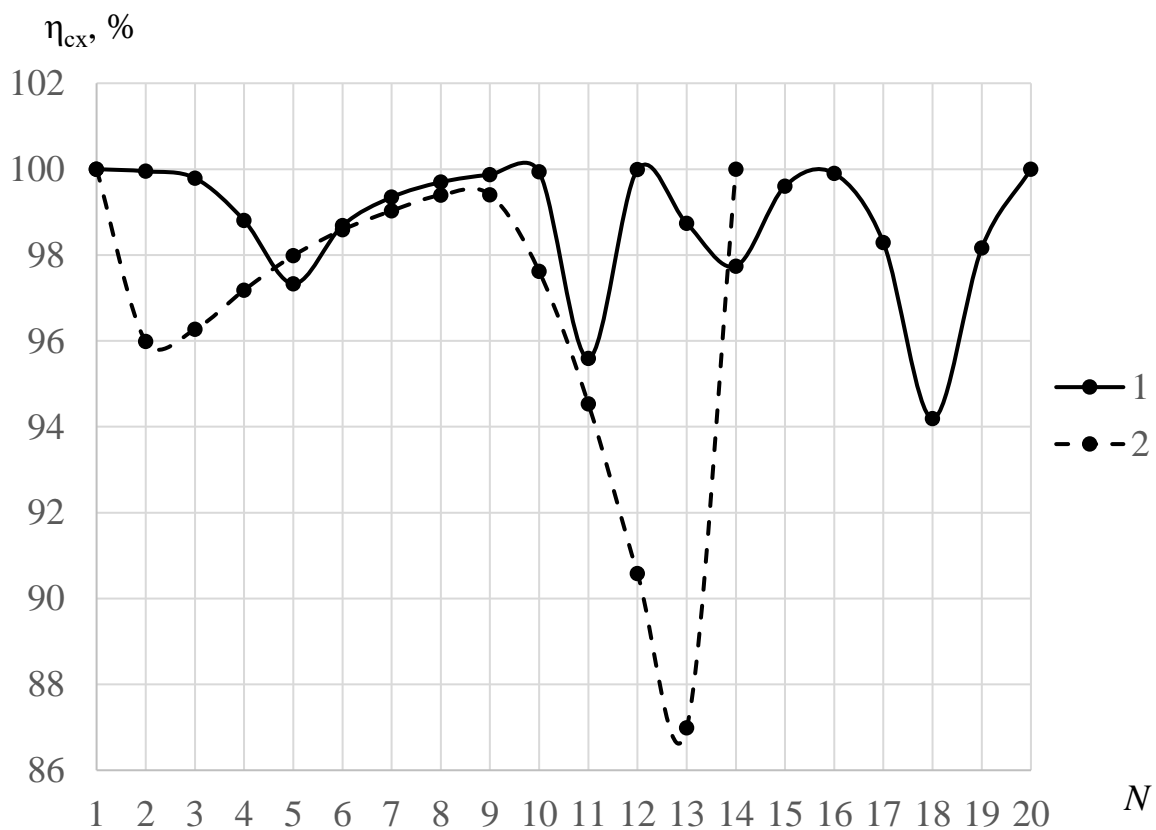


Рис. 3.9. Зависимость схемного КПД каскада от номера ступени:  
1 – оптимизированный каскад; 2 – исходный каскад

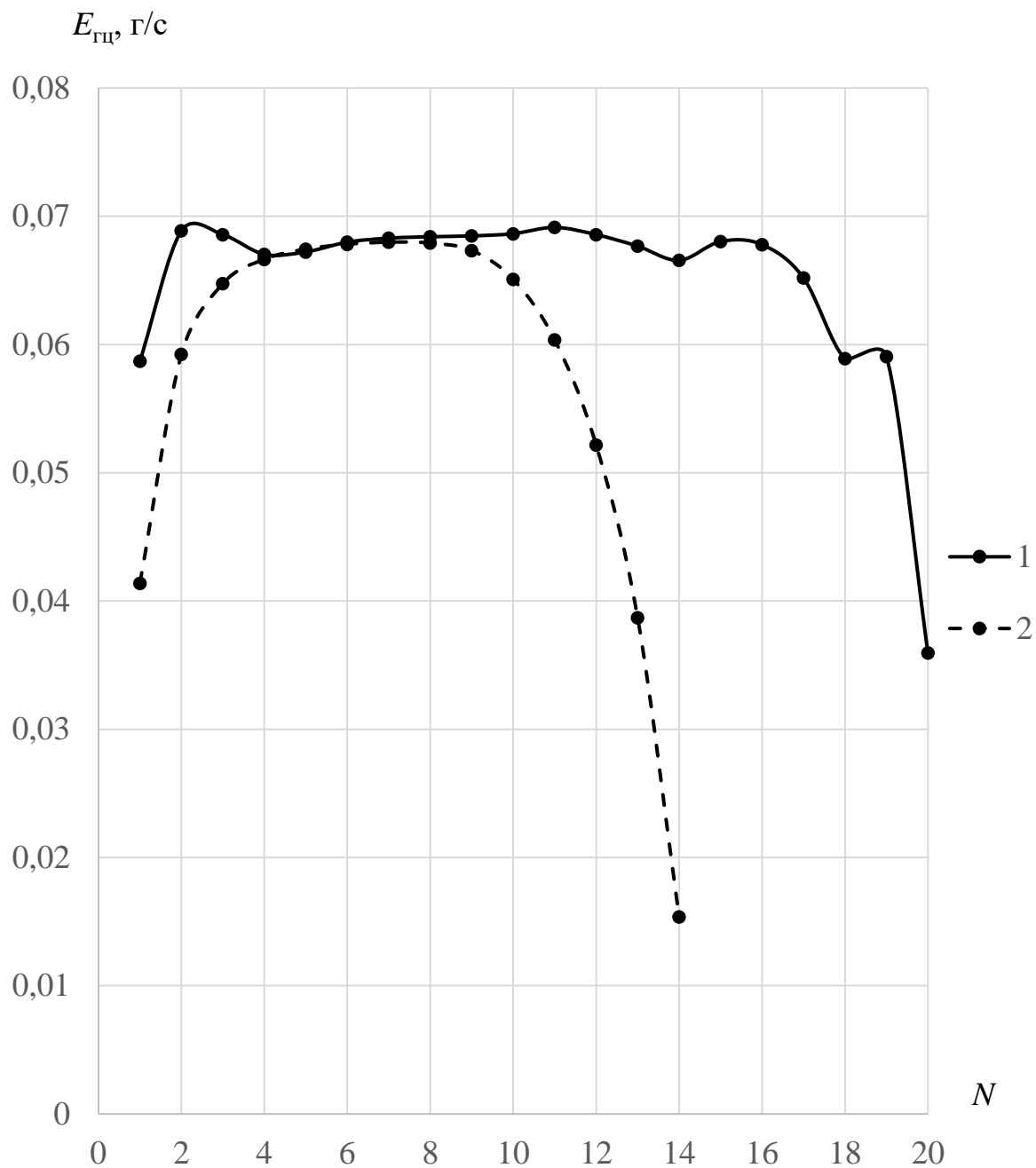


Рис. 3.10. Зависимость фактической разделительной способности одной газовой центрифуги от номера ступени:  
 1 – оптимизированный каскад; 2 – исходный каскад

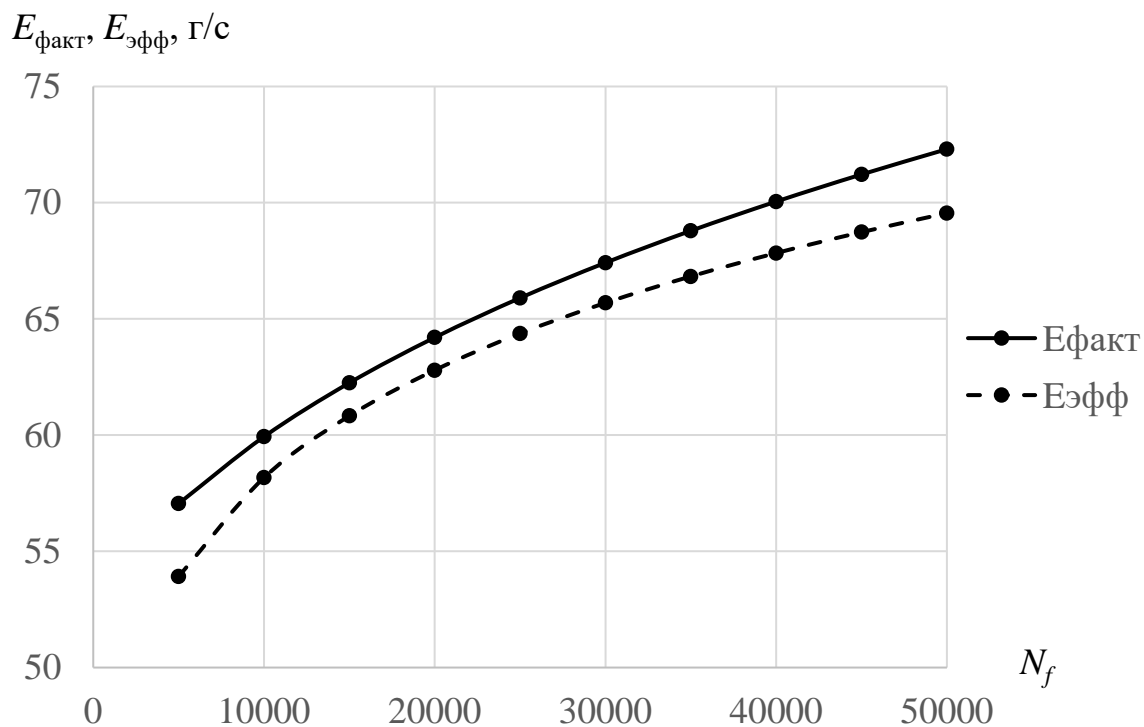


Рис. 3.11. Зависимости фактической и эффективной разделительных способностей ступеней от количества газовых центрифуг в ступени питания

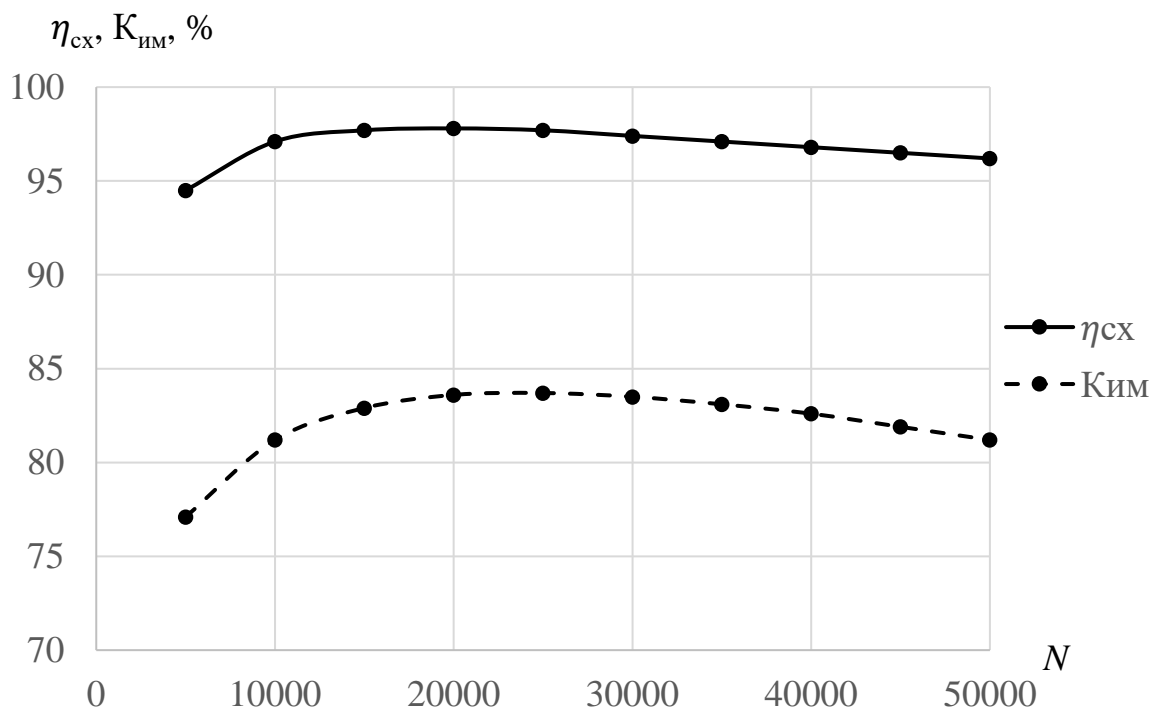


Рис. 3.12. Зависимости схемного КПД и коэффициента использования мощности каскада от количества газовых центрифуг в ступени питания

## Практическое занятие 1.

### Изучение описания программного обеспечения для расчета каскадов и проведение тестовых расчетов

**Цель занятия** – изучение описания программного обеспечения для расчета каскадов и проведение тестовых расчетов каскада постоянной ширины.

В практике центробежного разделения изотопов неурановых элементов чаще всего применяют каскады постоянной ширины, в которых все разделительные ступени содержат одинаковое количество центрифуг, соединенных параллельно. Такие установки представляют собой прямоугольные каскады (ПК) [1].

#### **Порядок выполнения:**

1. Изучить описание программного обеспечения для расчета каскадов.
2. Получить у преподавателя вариант индивидуального задания для проведения тестовых расчетов. Варианты задания представлены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

*Варианты для выполнения задания 1*

№ варианта	Количество ступеней	Степень питания	Количество ГЦ в ступени	Концентрация отбора, %	Концентрация отвала, %
1	4	2	10 000	1	0,1
2	5	3	15 000	3	0,2
3	6	4	20 000	4	0,1
4	7	4	25 000	5	0,2
5	8	5	30 000	2	0,1
6	4	2	35 000	3	0,2
7	5	4	40 000	1	0,1
8	6	4	45 000	5	0,2
9	7	5	50 000	2	0,1
10	8	5	10 000	3	0,2
11	4	2	15 000	4	0,1
12	5	3	20 000	5	0,2
13	6	3	25 000	2	0,1
14	7	4	30 000	3	0,2
15	8	4	35 000	4	0,1



3. Провести согласно данным варианта расчет каскада. При этом не использовать потоки закрутки и не оптимизировать дополнительный (второй) поток питания. Использовать только основной поток питания (автоматически задается его концентрация – 0,711 %). Выбрать первый набор  $a[i]$  (0,5 0,5 0,5 0,1), тип задач № 1. После проведения расчета сделать скриншот вкладки «Расчет» (см. рис. 2.1).

4. Сохранить результаты расчета и перенести данные:  $\theta$  – коэффициент деления потока (Teta);  $\chi$  – полный коэффициент разделения ступеней (X);  $E_{\text{эфф}}$  – эффективная разделительная способность ступеней;  $E_{\text{факт}}$  – фактическая разделительная способность ступеней в Microsoft Excel (см. п. 2.9).

5. По выгруженным данным построить зависимости коэффициента деления потока, полного коэффициента разделения, эффективной и фактической способности разделения от номера ступени.

6. Составить и защитить отчет по проделанной работе.

Отчеты по всем практическим занятиям должны включать в себя следующие разделы:

- титульный лист;
- цель работы;
- задание;
- полученные результаты (скриншоты, таблицы, графики) их интерпретация;
- выводы по работе.

#### **Вопросы и задания для проверки усвоения материала:**

1. Как в программе рассчитывается  $\chi$  – полный коэффициент разделения?
2. Перечислите параметры, которые являются строго заданными величинами и варьируются в процессе решения задачи оптимизации.
3. Какая переменная отвечает за «сшивку» каскада?
4. Опишите процесс обработки данных, полученных в результате расчета.
5. Что делать, если программа выдает сообщение типа «0.3 is not a valid floating point value»?

### **Практическое занятие 2.**

#### **Определение оптимального номера ступени подачи основного потока питания для каскада постоянной ширины**

**Цель занятия** – определение влияния номера ступени подачи основного потока питания на характеристики эффективности разделения каскада постоянной ширины; оптимального номера ступени подачи основного потока питания для каскада постоянной ширины.

**Порядок выполнения:**

1. Получить у преподавателя вариант индивидуального задания для проведения расчетов. Варианты задания представлены в табл. 3.11. Количество ступеней для всех вариантов – 7.

Таблица 3.11

*Варианты для выполнения задания 2*

№ варианта	Количество ГЦ в ступени	Концентрация отбора, %	Концентрация отвала, %
1	50 000	2	0,2
2	45 000	3	0,2
3	40 000	3	0,2
4	35 000	3	0,2
5	30 000	2	0,3
6	30 000	3	0,2
7	35 000	1	0,3
8	40 000	4	0,5
9	45 000	4	0,3
10	50 000	3	0,4
11	40 000	5	0,3
12	35 000	5	0,4
13	50 000	4	0,5
14	45 000	5	0,2
15	30 000	5	0,3

2. Провести расчет каскада согласно данным варианта, изменяя номер ступени питания со 2 по 6. При этом не использовать потоки закрутки и не оптимизировать дополнительный (второй) поток питания. Использовать только основной поток питания (автоматически задается его концентрация – 0,711 %). Выбрать первый набор  $a[i]$  (0,5 0,5 0,5 0,1), тип задач № 1.

3. Сохранить результаты расчетов и перенести данные:  $E_{\text{эфф}}$  – эффективная разделительная способность каскада;  $E_{\text{факт}}$  – фактическая разделительная способность каскада;  $\eta_{\text{сх}}$  – схемный КПД каскада;  $K_{\text{им}}$  – коэффициент использования разделительной мощности каскада в Microsoft Excel (см. п. 2.9).

4. Заполнить табл. 3.12 результатами расчетов.

Таблица 3.12

*Результаты расчета характеристик эффективности каскада  
при изменении номера ступени подачи питания*

№ ступени питания	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\text{факт}}$	$\eta_{\text{сх}}$	$K_{\text{им}}$
2				
...				
6				

5. По данным табл. 3.12 построить зависимости эффективной, фактической разделительной способности от номера ступени, в которую подается поток основного питания на одном графике и схемного КПД каскада, коэффициента использования разделительной мощности каскада от номера ступени питания на другом графике.

6. Составить и защитить отчет по проделанной работе.

В выводе необходимо указать значение оптимального номера ступени подачи питания каскада.

#### **Вопросы и задания для проверки усвоения материала:**

1. Как в программе рассчитывают схемный КПД?
2. Какой каскад называют каскадом постоянной ширины (прямоугольным каскадом)?
3. Почему необходимо брать данные расчета из файла с результатами, а не из окна программы?
4. На что влияет набор  $a[i]$ ?
5. Дайте определение полного коэффициента разделения ступени.
6. Дайте определение коэффициентов разделения по обогащенной и обедненной фракции.

### **Практическое занятие 3.**

#### **Влияние модельных коэффициентов разделительной характеристики газовых центрифуг на параметры каскада постоянной ширины**

**Цель занятия** – исследование влияния модельных коэффициентов разделительной характеристики газовых центрифуг на полный коэффициент разделения ступеней, эффективную разделительную способность каскада, фактическую разделительную способность каскада, схемный КПД каскада, коэффициент использования разделительной мощности каскада.

#### **Порядок выполнения:**

1. Получить у преподавателя вариант индивидуального задания для проведения расчетов. Варианты задания представлены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

## Варианты для выполнения задания 3

№ варианта	Количество ступеней	Степень питания	Количество ГЦ в ступени	Концентрация отбора легкой фракции, %	Концентрация отбора тяжелой фракции, %
1	8	4	35 000	4	0,1
2	7	4	30 000	3	0,2
3	6	3	25 000	2	0,1
4	5	3	20 000	5	0,2
5	4	2	15 000	4	0,1
6	8	5	35 000	3	0,2
7	7	5	40 000	2	0,1
8	6	4	50 000	5	0,2
9	5	4	45 000	1	0,1
10	4	2	35 000	3	0,2
11	8	5	30 000	2	0,1
12	7	4	25 000	5	0,2
13	6	4	20 000	4	0,1
14	5	3	15 000	3	0,2
15	4	2	10 000	1	0,1

2. Провести согласно данным варианта расчеты каскада, изменяя набор модельных коэффициентов разделительной характеристики газовых центрифуг ( $a_i$ ). При этом потоки закрутки не использовать и не оптимизировать (второй) поток питания. Использовать только основной поток питания (автоматически задается его концентрация – 0,711 %). Тип задач № 1.

3. Сохранить результаты расчетов и перенести данные:  $\chi$  – полный коэффициент разделения ступеней;  $E_{\text{эфф}}$  – эффективная разделительная способность каскада;  $E_{\text{факт}}$  – фактическая разделительная способность каскада;  $\eta_{\text{сх}}$  – схемный КПД каскада;  $K_{\text{им}}$  – коэффициент использования разделительной мощности каскада в Microsoft Excel (см. п. 2.9).

4. Заполнить табл. 3.14, 3.15 результатами расчетов.

Таблица 3.14

*Результаты расчета полного коэффициента разделения ступеней  
для разных наборов модельных коэффициентов ГЦ*

номер набора $a_i$	набор $a_i$	$\chi_1$	$\chi_2$	...	$\chi_n$
1	0,5 0,5 0,5 0,1				
2	1 1 1 0,2				
3	0,7 0,7 0,7 0,1				
4	0,7 0,3 1 0,1				
5	0,5 0,7 0,4 0,2				
9	0,5 0 0 0,2				
7	0,5 0 0 0,1				

Таблица 3.15

*Результаты расчета характеристик эффективности каскада  
для разных наборов модельных коэффициентов ГЦ*

номер набора $a_i$	набор $a_i$	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\text{факт}}$	$\eta_{\text{сх}}$	$K_{\text{им}}$
1	0,5 0,5 0,5 0,1				
2	1 1 1 0,2				
3	0,7 0,7 0,7 0,1				
4	0,7 0,3 1 0,1				
5	0,5 0,7 0,4 0,2				
6	0,5 0 0 0,2				
7	0,5 0 0 0,1				

5. По данным табл. 3.14 построить зависимость полного коэффициента разделения ступеней от номера ступени при разных наборах коэффициентов  $a_i$  на одном графике.

6. По данным табл. 3.15 построить зависимости эффективной разделительной способности и фактической разделительной способности каскада от номера набора модельных коэффициентов разделительной характеристики газовой центрифуги на одном графике, а также схемного КПД каскада и коэффициента использования разделительной мощности каскада от номера набора модельных коэффициентов разделительной характеристики газовых центрифуг на другом графике.

7. Составить и защитить отчет по проделанной работе.

В выводах нужно указать оптимальный номер набора модельных коэффициентов газовых центрифуг ( $a_i$ ).

#### **Вопросы и задания для проверки усвоения материала:**

1. Что является целевой функцией оптимизации?
2. Является ли поток дополнительного питания каскада строго заданной величиной?
3. Что рассчитывают после определения основных параметров ступеней?
4. Перечислите формулы, которые рассчитывают давление в трассах отвала и питания.
5. При каком значении концентрации в случае «слабого обогащения» обогащение  $\delta'$  и обеднение  $\delta''$  достигают максимального значения?
6. Как, согласно теории Дирака–Пайерлса, вводится понятие разделительной способности (мощности) ступени?

#### **Практическое занятие 4.**

##### **Влияние потоков закрутки на ступенях отбора тяжелой и легкой фракций на параметры каскада постоянной ширины**

**Цель занятия** – исследование влияния потоков закрутки на ступенях отбора тяжелой и легкой фракций на полный коэффициент разделения ступеней, эффективную разделительную способность каскада, фактическую разделительную способность каскада, схемный КПД каскада, коэффициент использования разделительной мощности каскада.

Иногда для достижения необходимого обогащения и производительности каскада используют так называемые потоки закрутки (рис. 3.13). Часть потока легкой фракции, выходящей из ступени  $n_p$ , образует поток отбора легкой фракции каскада  $P$ , а другая часть возвращается на питание той же ступени, где смешивается с легкой фракцией предыдущей ступени. Аналогично часть потока тяжелой фракции, выходящей из ступени  $1$ , извлекается из каскада, образуя поток отбора тяжелой фракции каскада  $W$ , а другая часть возвращается в ту же ступень и смешивается с потоком тяжелой фракции второй ступени [1].

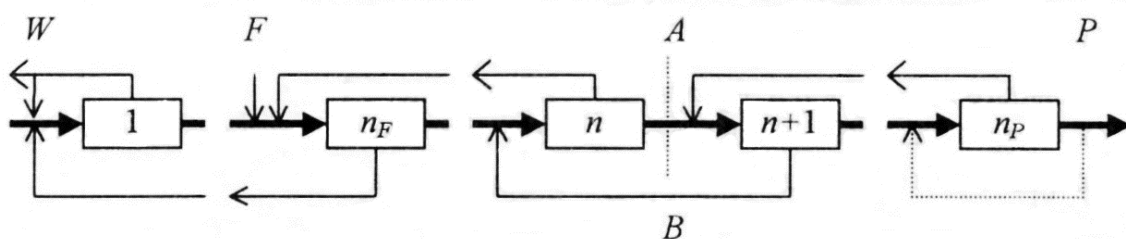


Рис. 3.13. Прямоугольный каскад с закруткой потоков на концах

**Порядок выполнения:**

1. Получить у преподавателя вариант индивидуального задания для проведения расчетов. Варианты задания представлены в табл. 3.16.

2. Провести расчет каскада согласно данным варианта: без потоков закрутки, с потоком закрутки на ступени отбора легкой фракции каскада, с потоком закрутки на ступени отбора тяжелой фракции каскада, с двумя потоками закрутки на крайних ступенях каскада. При этом не оптимизировать (второй) поток питания. Использовать только основной поток питания (автоматически задается его концентрация – 0,711 %). Выбрать второй набор  $a[i]$  (1 1 1 0,2), тип задач № 1.

Таблица 3.16

*Варианты для выполнения задания 4*

№ варианта	Количество ступеней	Степень питания	Количество ГЦ в ступени	Концентрация отбора, %	Концентрация отвала, %
1	9	5	35 000	4	0,1
2	7	4	30 000	3	0,2
3	5	3	25 000	2	0,1
4	9	5	20 000	5	0,2
5	7	4	25 000	4	0,1
6	5	3	35 000	3	0,2
7	9	5	40 000	2	0,1
8	7	4	50 000	5	0,2
9	5	3	45 000	1	0,1
10	9	5	40 000	3	0,2
11	7	4	45 000	2	0,1
12	5	3	20 000	5	0,2
13	9	5	20 000	4	0,1
14	7	4	15 000	3	0,2
15	5	3	10 000	2	0,1

3. Сохранить результаты расчета и перенести данные:  $\chi$  – полный коэффициент разделения ступеней;  $E_{\text{эфф}}$  – эффективная разделительная способность каскада;  $E_{\text{факт}}$  – фактическая разделительная способность каскада;  $\eta_{\text{сх}}$  – схемный КПД каскада;  $K_{\text{им}}$  – коэффициент использования разделительной мощности каскада в Microsoft Excel (см. п. 2.9).

4. Заполнить табл. 3.17, 3.18 результатами расчетов.

5. По данным табл. 3.17 построить зависимость полного коэффициента разделения ступеней от номера ступени каскада без наличия потоков закрутки, с потоком закрутки на ступени отбора легкой фракции каскада, с потоком закрутки на ступени отбора тяжелой фракции каскада, с двумя потоками закрутки на конечных ступенях каскада на одном графике.

6. По данным табл. 3.18 сделать заключение о том, как изменяются указанные величины в зависимости от наличия/отсутствия потоков закрутки, сравнить влияние потоков закрутки на ступенях отбора легкой и тяжелой фракций каскада.

Таблица 3.17

*Результаты расчета полных коэффициентов разделения ступеней для различных вариантов организации потока закрутки*

Тип каскада	$\chi_1$	$\chi_2$	...	$\chi_n$
1				
2				
3				
4				

\*Типы каскадов: 1-й тип – без потоков закрутки; 2-й тип – с потоком закрутки на ступени отбора легкой фракции каскада; 3-й тип – с потоком закрутки на ступени отбора тяжелой фракции каскада; 4-й тип – с двумя потоками закрутки на крайних ступенях каскада.

Таблица 3.18

*Результаты расчета характеристик эффективности каскада для различных вариантов реализации потоков закрутки*

Тип каскада	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\text{факт}}$	$\eta_{\text{сх}}$	$K_{\text{им}}$
1				
2				
3				
4				

\*Типы каскадов: 1-й тип – без потоков закрутки; 2-й тип – с потоком закрутки на ступени отбора легкой фракции каскада; 3-й тип – с потоком закрутки на ступени отбора тяжелой фракции каскада; 4-й тип – с двумя потоками закрутки на крайних ступенях каскада.

7. Составить и защитить отчет по проделанной работе.

В выводах нужно указать оптимальный(ые) вариант(ы) потока закрутки.



**Вопросы и задания для проверки усвоения материала:**

1. По какой формуле рассчитывают потенциал разделения?
2. Что значит равенство  $C_n^+ = K$  ?
3. Что такое поток закрутки?
4. Для чего нужны потоки закрутки?
5. Опишите подход определения явного вида потенциала разделения в случае «слабого обогащения».

**Практическое занятие 5.**  
**Влияние дополнительного питания**  
**на параметры каскада постоянной ширины**

**Цель занятия** – исследование влияния дополнительного потока питания на полный коэффициент разделения ступеней, эффективную разделительную способность каскада, фактическую разделительную способность каскада, схемный КПД каскада, коэффициент использования разделительной мощности каскада; определение оптимальной ступени подачи дополнительного питания в каскад.

В ряде случаев на разделительных предприятиях в качестве дополнительного (или основного) потока питания каскада используют отвалы прошлых лет с повышенной концентрацией  $^{235}\text{U}$  или регенерированный уран. Иногда также в качестве потока подпитки подают поток отбора тяжелой фракции этого же каскада. На практике еще используются каскады с тремя потоками питания: основной поток питания природным ураном и два дополнительных потока питания отвальным и регенерированным ураном соответственно [1, 6].

**Порядок выполнения:**

1. Получить у преподавателя вариант индивидуального задания для проведения расчетов. Варианты задания представлены в табл. 3.19.

Таблица 3.19

*Варианты для выполнения задания 5*

№ варианта	Количество ступеней	Степень подачи основного питания	Количество ГЦ в ступени	Концентрация потока отбора легкой фракции каскада, %	Концентрация потока отбора тяжелой фракции каскада, %	Поток дополнительного питания, г/с	Концентрация дополнительного потока питания, %
1	10	5	50 000	2	0,1	50	0,1
2	11	5	50 000	3	0,2	50	0,2

Окончание табл. 3.19

№ варианта	Количество ступеней	Степень подачи основного питания	Количество ГЦ в ступени	Концентрация потока отбора легкой фракции каскада, %	Концентрация потока отбора тяжелой фракции каскада, %	Поток дополнительного питания, г/с	Концентрация дополнительного потока питания, %
3	12	6	45 000	4	0,3	40	0,1
4	13	6	45 000	1	0,1	40	0,2
5	14	6	40 000	2	0,1	30	0,1
6	10	6	40 000	3	0,2	30	0,2
7	11	6	35 000	2	0,1	30	0,1
8	12	6	35 000	2	0,2	20	0,2
9	13	7	30 000	3	0,1	20	0,1
10	14	7	30 000	5	0,2	30	0,2
11	10	5	25 000	4	0,1	30	0,1
12	11	5	25 000	3	0,2	30	0,2
13	12	6	25 000	1	0,1	40	0,1
14	13	7	20 000	2	0,2	20	0,2
15	14	7	20 000	3	0,3	20	0,1

2. Провести согласно данным варианта расчет каскада изменяя номер ступени подачи дополнительного питания от  $p-3$  до  $p+3$ , исключая ступень  $p$ , в которую подается основной поток питания (например, если ступень подачи основного питания 7, то нужно провести расчеты при номерах ступени подачи дополнительного потока питания 4, 5, 6, 8, 9, 10). При этом не нужно оптимизировать дополнительный (второй) поток питания. Концентрация основного потока питания задается автоматически (0,711 %), концентрация и поток дополнительного питания указаны в табл. 3.19. Выбрать первый набор  $a[i]$  (0,5 0,5 0,5 0,1), тип задач № 1.

3. Сохранить результаты расчета и перенести данные:  $\chi$  – полный коэффициент разделения ступеней;  $E_{\text{эфф}}$  – эффективная разделительная способность каскада;  $E_{\text{факт}}$  – фактическая разделительная способность каскада;  $\eta_{\text{сх}}$  – схемный КПД каскада;  $K_{\text{им}}$  – коэффициент использования разделительной мощности каскада в Microsoft Excel (см. п. 2.9).

4. Заполнить табл. 3.20, 3.21 результатами расчетов.

5. По данным табл. 3.20 построить зависимость полного коэффициента разделения ступеней от номера ступени при разных значениях номера ступени подачи дополнительного потока питания на одном графике.

Таблица 3.20

*Результаты расчета полного коэффициента разделения ступеней при изменении номера ступени подачи дополнительного питания*

Номер ступени подачи дополнительного потока питания	$\chi_1$	$\chi_2$	...	$\chi_n$
$p-3$				
...				
$p+3$				

Таблица 3.21

*Результаты расчета характеристик эффективности каскада при изменении номера ступени подачи дополнительного питания*

Номер ступени подачи дополнительного потока питания	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\text{факт}}$	$\eta_{\text{сх}}$	$K_{\text{им}}$
$p-3$				
...				
$p+3$				

6. По данным табл. 3.21 построить зависимости эффективной и фактической разделительной способности каскада от номера ступени подачи дополнительного потока питания на одном графике, а также схемного КПД каскада и коэффициента использования разделительной мощности каскада от номера ступени подачи дополнительного потока питания на другом графике.

7. Составить и защитить отчет о проделанной работе.

В выводах нужно указать оптимальный номер ступени подачи дополнительного потока питания.

#### **Вопросы и задания для проверки усвоения материала:**

1. Охарактеризуйте главную особенность противоточно-симметричных каскадов.
2. Как соединены газовые центрифуги в ступени каскада?
3. Как в программе рассчитывают коэффициент использования разделительной мощности?
4. Как рассчитывают коэффициент деления потока?
5. Как в случае слабого обогащения связана величина разделительной способности с уменьшением энтропии при разделении на ступени?
6. Как определяют разделительный потенциал в случае произвольных обогащений на ступени?

## Практическое занятие 6.

### Влияние количества газовых центрифуг в ступени питания на параметры каскада

**Цель занятия** – исследование влияния количества ГЦ в ступени подачи потока питания в каскад на полный коэффициент разделения ступеней, эффективную разделительную способность каскада, фактическую разделительную способность каскада, схемный КПД каскада, коэффициент использования разделительной мощности каскада; определение оптимального количества ГЦ в ступени подачи потока питания в каскад.

#### **Порядок выполнения:**

1. Получить у преподавателя вариант индивидуального задания для проведения расчетов. Варианты задания представлены в табл. 3.22.

Таблица 3.22

*Варианты для выполнения задания 6*

№ варианта	Количество ступеней в каскаде	Степень подачи основного потока питания	Количество ГЦ в ступенях (кроме ступени подачи потока питания)	Концентрация отбора потока легкой фракции каскада, %	Концентрация отбора потока тяжелой фракции каскада, %
1	10	5	40 000	2	0,1
2	11	5	40 000	3	0,2
3	12	6	35 000	4	0,3
4	13	6	35 000	1	0,1
5	14	6	30 000	2	0,1
6	10	6	30 000	3	0,2
7	11	6	25 000	1	0,1
8	12	6	25 000	2	0,2
9	13	7	20 000	3	0,1
10	14	7	20 000	1	0,2
11	10	5	15 000	2	0,1
12	11	5	15 000	3	0,2
13	12	6	15 000	1	0,1
14	13	7	15 000	2	0,2
15	14	7	15 000	3	0,3

2. Провести согласно данным варианта расчет каскада, изменяя количество ГЦ в ступени подачи потока питания от 5000 до 50 000 с шагом

5000. При этом не оптимизировать дополнительный (второй) поток питания. Использовать только основной поток питания (автоматически задается его концентрация – 0,711 %). Выбрать первый набор  $a[i]$  (0,5 0,5 0,5 0,1), тип задач № 1.

3. Сохранить результаты расчета и перенести данные:  $\chi$  – полный коэффициент разделения ступеней;  $E_{\text{эфф}}$  – эффективная разделительная способность каскада;  $E_{\text{факт}}$  – фактическая разделительная способность каскада;  $\eta_{\text{сх}}$  – схемный КПД каскада;  $K_{\text{им}}$  – коэффициент использования разделительной мощности каскада в Microsoft Excel (см. п. 2.9).

4. Заполнить табл. 3.23, 3.24 результатами расчетов.

Таблица 3.23

*Результаты расчета полного коэффициента разделения ступеней при изменении количества ГЦ в ступени подачи потока питания*

Количество ГЦ в ступени подачи потока питания	$\chi_1$	$\chi_2$	...	$\chi_n$
5000				
...				
50 000				

Таблица 3.24

*Результаты расчета характеристик эффективности каскада при изменении количества ГЦ в ступени подачи потока питания*

Количество ГЦ в ступени подачи потока питания	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\text{факт}}$	$\eta_{\text{сх}}$	$K_{\text{им}}$
5000				
...				
50 000				

5. По данным табл. 3.23 построить зависимость полного коэффициента разделения ступеней от номера ступени при разных значениях номера ступени подачи дополнительного потока питания на одном графике.

6. По данным табл. 3.24 построить зависимости эффективной и фактической разделительной способности каскада от номера ступени подачи дополнительного потока питания на одном графике, а также схемного КПД каскада и коэффициента использования разделительной мощности каскада от количества газовых центрифуг в ступени питания.

7. Составить и защитить отчет о проделанной работе.

В выводах нужно указать оптимальное значение количества ГЦ в ступени подачи потока питания.

**Вопросы и задания для проверки усвоения материала:**

1. Как ступени соединены между собой в каскаде и для чего?
2. Дайте определение симметричного противоточного разделительного каскада.
3. Перечислите основные параметры симметричного противоточного каскада.
4. Из каких соображений можно получить конечно-разностные уравнения, описывающие процесс разделения в каскаде?
5. Как выглядят уравнения противоточного симметричного каскада в случае «слабого обогащения»?

**Практическое занятие 7.**

**Влияние количества газовых центрифуг в ступени отбора легкой фракции каскада на параметры каскада**

**Цель занятия** – исследование влияния количества ГЦ в ступени отбора легкой фракции каскада на полный коэффициент разделения ступеней, эффективную разделительную способность каскада, фактическую разделительную способность каскада, схемный КПД каскада, коэффициент использования разделительной мощности каскада; определение оптимального количества ГЦ в ступени отбора легкой фракции каскада.

**Порядок выполнения:**

1. Получить у преподавателя вариант индивидуального задания для проведения расчетов. Варианты задания представлены в табл. 3.25.

Таблица 3.25

*Варианты для выполнения задания 7*

№ варианта	Количество ступеней каскада	Ступень подачи основного потока питания	Количество ГЦ в ступенях (кроме ступени отбора легкой фракции)	Концентрация отбора легкой фракции каскада, %	Концентрация отбора тяжелой фракции каскада, %
1	10	5	40 000	2	0,1
2	11	5	40 000	3	0,2
3	12	6	35 000	4	0,3
4	13	6	35 000	1	0,1
5	14	6	30 000	2	0,1
6	10	6	30 000	3	0,2

№ варианта	Количество ступеней каскада	Степень подачи основного потока питания	Количество ГЦ в ступенях (кроме ступени отбора легкой фракции)	Концентрация отбора легкой фракции каскада, %	Концентрация отбора тяжелой фракции каскада, %
7	11	6	25 000	1	0,1
8	12	6	25 000	2	0,2
9	13	7	20 000	3	0,1
10	14	7	20 000	1	0,2
11	10	5	15 000	2	0,1
12	11	5	15 000	3	0,2
13	12	6	15 000	1	0,1
14	13	7	15 000	2	0,2
15	14	7	15 000	3	0,3

2. Провести согласно данным варианта расчет каскада, изменяя количество ГЦ в ступени отбора легкой фракции каскада от 5000 до 50 000 с шагом 5000 (ступень отбора легкой фракции каскада в интерфейсе программы – крайняя правая). При этом не оптимизировать дополнительный (второй) поток питания. Использовать только основной поток питания (автоматически задается его концентрация – 0,711 %). Выбрать первый набор  $a[i]$  (0,5 0,5 0,5 0,1), тип задач № 1.

3. Сохранить результаты расчета и перенести данные:  $\chi$  – полный коэффициент разделения ступеней;  $E_{\text{эфф}}$  – эффективная разделительная способность каскада;  $E_{\text{факт}}$  – фактическая разделительная способность каскада;  $\eta_{\text{сх}}$  – схемный КПД каскада;  $K_{\text{им}}$  – коэффициент использования разделительной мощности каскада в Microsoft Excel (см. п. 2.9).

4. Заполнить табл. 3.26, 3.27 результатами расчетов.

Таблица 3.26

*Результаты расчета полного коэффициента разделения ступеней при изменении количества ГЦ в ступени отбора легкой фракции каскада*

Количество ГЦ в ступени отбора легкой фракции каскада	$\chi_1$	$\chi_2$	...	$\chi_n$
5000				
...				
50 000				

Таблица 3.27

*Результаты расчета характеристик эффективности каскада при изменении количества ГЦ в ступени отбора легкой фракции каскада*

Количество ГЦ в ступени отбора легкой фракции каскада	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\text{факт}}$	$\eta_{\text{сх}}$	$K_{\text{им}}$
5000				
...				
50 000				

5. По данным табл. 3.26 построить зависимость полного коэффициента разделения ступеней от номера ступени каскада при разных значениях номера ступени подачи дополнительного потока питания на одном графике.

6. По данным табл. 3.27 построить зависимости эффективной и фактической разделительной способности каскада от номера ступени подачи дополнительного потока питания на одном графике, а также схемного КПД каскада и коэффициента использования разделительной мощности каскада от количества газовых центрифуг в ступени отбора легкой фракции.

7. Составить и защитить отчет о проделанной работе.

В выводах нужно указать оптимальное значение количества ГЦ в ступени отбора легкой фракции каскада.

#### **Вопросы и задания для проверки усвоения материала:**

1. Перечислите принципы каскадирования.
2. Опишите два принципиальных подхода к выбору критериев эффективности работы каскада.
3. Какой каскад называют «идеальным»?
4. Перечислите типы разделительных каскадов.
5. Опишите свойства идеального каскада с малым обогащением на ступени.
6. Какую величину называют коэффициентом деления потока ступени?

### **Практическое занятие 8.**

#### **Влияние количества газовых центрифуг в ступени отбора тяжелой фракции каскада на параметры каскада**

**Цель занятия** – исследование влияния количества ГЦ в ступени отбора тяжелой фракции каскада на полный коэффициент разделения ступеней, эффективную разделительную способность каскада, фактическую разделительную способность каскада, схемный КПД каскада, коэффициент использования разделительной мощности каскада; определение оптимального количества ГЦ в ступени отбора тяжелой фракции каскада.



**Порядок выполнения:**

1. Получить у преподавателя вариант индивидуального задания для проведения расчетов. Варианты задания представлены в табл. 3.28.

Таблица 3.28

*Варианты для выполнения задания 8*

№ варианта	Количество ступеней каскада	Степень подачи основного потока питания	Количество ГЦ в ступенях (кроме ступени отбора тяжелой фракции каскада)	Концентрация отбора легкой фракции каскада, %	Концентрация отбора тяжелой фракции каскада, %
1	10	5	40 000	2	0,1
2	11	5	40 000	3	0,2
3	12	6	35 000	4	0,3
4	13	6	35 000	1	0,1
5	14	6	30 000	2	0,1
6	10	6	30 000	3	0,2
7	11	6	25 000	1	0,1
8	12	6	25 000	2	0,2
9	13	7	20 000	3	0,1
10	14	7	20 000	1	0,2
11	10	5	15 000	2	0,1
12	11	5	15 000	3	0,2
13	12	6	15 000	1	0,1
14	13	7	15 000	2	0,2
15	14	7	15 000	3	0,3

2. Провести согласно данным варианта расчет каскада, изменяя количество ГЦ в ступени отбора тяжелой фракции каскада от 5000 до 50 000 с шагом 5000 (ступень отбора тяжелой фракции каскада в интерфейсе программы – крайняя левая). При этом не оптимизировать дополнительный (второй) поток питания. Использовать только основной поток питания (автоматически задается его концентрация – 0,711 %). Выбрать первый набор  $a[i]$  (0,5 0,5 0,5 0,1), тип задач № 1.

3. Сохранить результаты расчета и перенести данные:  $\chi$  – полный коэффициент разделения ступеней;  $E_{\text{эфф}}$  – эффективная разделительная способность каскада;  $E_{\text{факт}}$  – фактическая разделительная способность каскада;  $\eta_{\text{сх}}$  – схемный КПД каскада;  $K_{\text{им}}$  – коэффициент использования разделительной мощности каскада в Microsoft Excel (см. п. 2.9).

4. Заполнить табл. 3.29, 3.30 результатами расчетов.

Таблица 3.29

*Результаты расчета полных коэффициентов разделения ступеней при изменении количества ГЦ в ступени отбора тяжелой фракции каскада*

Количество ГЦ в ступени отбора тяжелой фракции каскада	$\chi_1$	$\chi_2$	...	$\chi_n$
5000				
...				
50 000				

Таблица 3.30

*Результаты расчета характеристик эффективности каскада при изменении количества ГЦ в ступени отбора тяжелой фракции каскада*

Количество ГЦ в ступени отбора тяжелой фракции каскада	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\text{факт}}$	$\eta_{\text{сх}}$	$K_{\text{им}}$
5000				
...				
50 000				

5. По данным табл. 3.29 построить зависимость полного коэффициента разделения ступеней от номера ступени каскада при разных значениях номера ступени подачи дополнительного потока питания на одном графике.

6. По данным табл. 3.30 построить зависимости эффективной и фактической разделительной способности каскада от номера ступени подачи дополнительного потока питания на одном графике, а также схемного КПД каскада и коэффициента использования разделительной мощности каскада от количества газовых центрифуг в ступени отбора тяжелой фракции.

7. Составить и защитить отчет о проделанной работе.

В выводах нужно указать оптимальное значение количества ГЦ в ступени отбора тяжелой фракции каскада.

#### **Вопросы и задания для проверки усвоения материала:**

1. Дайте определение функции ценности.
2. Какая величина принята за единицу работы разделения?
3. Каковы особенности идеального каскада с немалым коэффициентом разделения на ступенях?
4. Опишите подходы к оптимизации (по суммарному потоку) каскада с немалым обогащением на ступенях и с заданными концентрациями целевого изотопа в потоках отбора и отвала.

## Практическое занятие 9.

### Автоматический подбор количества газовых центрифуг в ступенях каскада

**Цель занятия** – осуществление автоматического подбора количества ГЦ в ступенях каскада с использованием программного обеспечения «Каскад газовых центрифуг».

#### **Порядок выполнения:**

1. Получить у преподавателя вариант индивидуального задания для проведения расчетов. Варианты задания представлены в табл. 3.31. Эти данные являются исходными. В процессе автоматического подбора количества ГЦ в ступенях каскада и количество ступеней изменятся.

Таблица 3.31

*Варианты для выполнения задания 9*

№ варианта	Количество ступеней каскада	Степень подачи потока питания	Количество ГЦ в ступени	Концентрация отбора легкой фракции каскада, %	Концентрация отбора тяжелой фракции каскада, %
1	10	5	40 000	1	0,1
2	10	6	40 000	3	0,2
3	10	7	35 000	4	0,1
4	11	5	35 000	5	0,2
5	11	6	30 000	2	0,1
6	11	7	30 000	3	0,2
7	12	6	40 000	1	0,1
8	12	7	40 000	5	0,2
9	12	8	35 000	2	0,1
10	13	6	35 000	3	0,2
11	13	7	30 000	4	0,1
12	13	8	30 000	5	0,2
13	14	7	40 000	2	0,1
14	14	8	40 000	3	0,2
15	14	9	35 000	4	0,1

2. Провести согласно данным варианта расчет каскада. При этом не использовать потоки закрутки и не оптимизировать дополнительный (второй) поток питания. Использовать только основной поток питания (автоматически задается его концентрация – 0,711 %). Выбрать первый набор  $a[i]$  (0,5 0,5 0,5 0,1), тип задач № 1. После проведения расчета сделать скриншот вкладки «Расчет» (см. рис. 2.1).

3. Сохранить результаты расчета и перенести данные:  $G$  – суммарный поток ступеней;  $\eta_{сх}$  – схемный КПД ступеней;  $E_{гц}$  – разделительная способность одной газовой центрифуги в каждой ступени;  $E_{эфф}$  – эффективная разделительная способность каскада;  $E_{факт}$  – фактическая разделительная способность каскада;  $\eta_{сх}$  – схемный КПД каскада;  $K_{им}$  – коэффициент использования разделительной мощности каскада в Microsoft Excel (см. п. 2.9).

4. Провести согласно данным варианта подбор количества газовых центрифуг в ступенях. Для этого после ввода исходных данных в программу необходимо выбрать: «Тип задач: № 2» и нажать кнопку «Подбор  $N_i$ », в диалоговом окне поставить галочку в поле: «Раскладывать ступень отбора дважды». При этом не использовать потоки закрутки и не оптимизировать дополнительный (второй) поток питания. Использовать только основной поток питания (автоматически задается его концентрация – 0,711 %). Выбрать первый набор  $a[i]$  (0,4 0,6 0,5 0,15), тип задач № 2. После проведения расчета сделать скриншот вкладки «Расчет» (см. рис. 2.1).

3. Сохранить результаты расчета и перенести данные:  $G$  – суммарный поток ступеней;  $\eta_{сх}$  – схемный КПД ступеней;  $E_{гц}$  – фактическая разделительная способность одной газовой центрифуги в каждой ступени;  $E_{эфф}$  – эффективная разделительная способность каскада;  $E_{факт}$  – фактическая разделительная способность каскада;  $\eta_{сх}$  – схемный КПД каскада;  $K_{им}$  – коэффициент использования разделительной мощности каскада в Microsoft Excel (см. п. 2.9).

4. Заполнить табл. 3.32, 3.33 результатами расчетов.

Таблица 3.32

*Результаты расчета суммарного потока ступеней, схемного КПД ступеней, разделительной способности одной газовой центрифуги в каждой ступени каскада для исходного и оптимизированного каскада*

Номер ступени	исходный			оптимизированный		
	$G$	$\eta_{сх}$	$E_{гц}$	$G$	$\eta_{сх}$	$E_{гц}$
1						
2						
...						
$n$						

Таблица 3.33

*Результаты расчета характеристик эффективности исходного и оптимизированного каскадов*

Каскад	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\text{факт}}$	$\eta_{\text{сх}}$	$K_{\text{им}}$
исходный				
оптимизированный				

5. По данным табл. 3.32 построить зависимости суммарного потока ступеней, схемного КПД ступеней, разделительной способности одной газовой центрифуги в ступени от номера ступени для исходного и оптимизированного каскада (три рисунка, на каждом по два графика).

6. По данным табл. 3.33 сделать заключение о том, как изменились указанные величины при автоматической оптимизации.

7. Составить и защитить отчет о проделанной работе.

В выводах нужно указать, как изменилось в результате расчета каскада количество ступеней, количество газовых центрифуг в них, изменился ли номер ступени подачи основного питания, как все это повлияло на форму каскада и на каких ступенях каскада указанные выше в п. 6 величины имеют максимальные значения.

#### **Вопросы и задания для проверки усвоения материала:**

1. Почему суммарный поток каскада со «смещением» может оказаться меньше суммарного потока идеального каскада из несимметричных ступеней?

2. Расскажите, как учитывают потери рабочего вещества при расчете идеального каскада.

3. Какой каскад называют прямоугольно-секционированным?

4. Что такое КПД формы каскада?

### **Практическое занятие 10.**

#### **Влияние концентрации потока отбора тяжелой фракции на параметры каскада постоянной ширины**

**Цель занятия** – исследование влияния концентрации потока отбора тяжелой фракции на полный коэффициент разделения ступеней, эффективную разделительную способность каскада, фактическую разделительную способность каскада, схемный КПД каскада, коэффициент использования разделительной мощности каскада; определение оптимальной концентрации потока отбора тяжелой фракции каскада постоянной ширины.

#### **Порядок выполнения:**

1. Получить у преподавателя вариант индивидуального задания для проведения расчетов. Варианты задания представлены в табл. 3.34.

Таблица 3.34

## Варианты для выполнения задания 10

№ варианта	Количество ступеней	Степень подачи основного питания	Количество ГЦ в ступени	Концентрация потока отбора легкой фракции каскада, %
1	10	5	50 000	2
2	11	5	50 000	3
3	12	6	45 000	4
4	13	6	45 000	1
5	14	6	40 000	2
6	10	6	40 000	3
7	11	6	35 000	1
8	12	6	35 000	2
9	13	7	30 000	3
10	14	7	30 000	1
11	10	5	25 000	2
12	11	5	25 000	3
13	12	6	25 000	1
14	13	7	20 000	2
15	14	7	20 000	3

2. Провести согласно данным варианта расчет каскада изменяя концентрацию потока тяжелой фракции (концентрацию отвала  $K'$ ) от 0,1 до 0,2 % с шагом 0,01 %. При этом не нужно оптимизировать дополнительный (второй) поток питания. Концентрация основного потока питания задается автоматически (0,711 %). Выбрать первый набор  $a[i]$  (0,5 0,5 0,5 0,1), тип задач № 1.

3. Сохранить результаты расчета и перенести данные:  $\chi$  – полный коэффициент разделения ступеней;  $E_{\text{эфф}}$  – эффективная разделительная способность каскада;  $E_{\text{факт}}$  – фактическая разделительная способность каскада;  $\eta_{\text{сх}}$  – схемный КПД каскада;  $K_{\text{им}}$  – коэффициент использования разделительной мощности каскада в Microsoft Excel (см. п. 2.9).

4. Заполнить табл. 3.35, 3.36 результатами расчетов.

Таблица 3.35

*Результаты расчета полного коэффициента разделения ступеней при изменении концентрации потока отбора тяжелой фракции каскада*

Концентрация потока отбора тяжелой фракции каскада, %	$\chi_1$	$\chi_2$	...	$\chi_n$
0,1				
0,11				
0,12				
0,13				
0,14				
0,15				
0,16				
0,17				
0,18				
0,19				
0,2				

Таблица 3.36

*Результаты расчета характеристик эффективности каскада при изменении концентрации потока отбора тяжелой фракции каскада*

Концентрация потока отбора тяжелой фракции каскада, %	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\text{факт}}$	$\eta_{\text{сх}}$	$K_{\text{им}}$
0,1				
0,11				
0,12				
0,13				
0,14				
0,15				
0,16				
0,17				
0,18				
0,19				
0,2				

5. По данным табл. 3.35 построить зависимость полного коэффициента разделения ступеней от номера ступени при разных значениях концентрации потока отбора тяжелой фракции на одном графике.

6. По данным табл. 3.36 построить зависимости эффективной и фактической разделительной способности каскада от концентрации

потока отбора тяжелой фракции на одном графике, а также схемного КПД каскада и коэффициента использования разделительной мощности каскада от концентрации потока отбора тяжелой фракции на другом графике.

7. Составить и защитить отчет о проделанной работе.

В выводах нужно указать, при какой концентрации в потоке отбора тяжелой фракции каскада указанные выше параметры имеют максимальные значения, а также целесообразность использования каскада с максимальными показателями эффективности его работы на практике.

**Вопросы и задания для проверки усвоения материала:**

1. Какой каскад называют каскадом постоянной ширины?
2. Какую величину называют полным коэффициентом разделения ступени?
3. Дайте определение «многополочной» схеме соединений каскадов.
4. Дайте определение несимметричному каскаду.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пособии приведено описание математической модели противоточно-симметричного каскада для разделения изотопов урана, описана компьютерная программа «Расчет каскада», созданная в Уральском федеральном университете имени Первого президента России Б.Н. Ельцина для оптимизации каскадов. Представлено 10 практических заданий для студентов, обучающихся по направлению 14.03.02 «Ядерные физика и технологии», предназначенных для получения студентами практических навыков расчета параметров и оптимизации противоточно-симметричных каскадов для разделения изотопов урана.

Тематика практических заданий, несомненно, является актуальной, т. к. расчет и оптимизация каскадов для разделения изотопов урана является востребованным направлением в ядерной индустрии.

Пособие не содержит информации по методам численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающей процесс разделения изотопов урана, используемым разностным схемам и подвижным расчетным сеткам, граничным условиям и основам математического моделирования. Указанные аспекты при необходимости могут быть изучены студентами при изучении соответствующих дисциплин или самостоятельно с использованием других литературных источников.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $n$  – количество ступеней каскада, шт.
- $p$  – номер ступени подачи основного потока питания.
- $T'$  – поток отбора тяжелой фракции каскада, г/с.
- $T_p$  – поток основного питания каскада, г/с.
- $T_{0j}$  – поток дополнительного питания каскада, г/с.
- $T$  – поток отбора легкой фракции каскада, г/с.
- $T_{3\text{ отб}}$  – поток закрутки на ступени отбора легкой фракции каскада, г/с.
- $T_{3\text{ отв}}$  – поток закрутки на ступени отбора тяжелой фракции каскада, г/с.
- $K'$  – концентрация потока отбора тяжелой фракции каскада.
- $K_p$  – концентрация основного потока питания каскада.
- $K_{0j}$  – концентрация дополнительного потока питания каскада.
- $K$  – концентрация потока отбора легкой фракции каскада.
- $\theta_j$  – коэффициент деления потока  $j$ -й ступени.
- $\chi_j$  – полный коэффициент разделения  $j$ -й ступени.
- $e_{0\text{ max}}$  – максимальная разделительная способность одной ГЦ, мг/с.
- $P_{Tj}$  – давление в трассе отбора тяжелой фракции  $j$ -й ступени, мм рт. ст.
- $P_{0j}$  – давление в трассе питания  $j$ -й ступени, мм рт. ст.
- $\tau'_j$  – транзитный поток смеси в направлении отбора тяжелой фракции каскада в сечении между  $(j-1)$ -й и  $j$ -й ступенями, г/с.
- $\tau'_{lj}$  – транзитный поток легкого изотопа в направлении отбора тяжелой фракции каскада в сечении между  $(j-1)$ -й и  $j$ -й ступенями, г/с.
- $N_j$  – количество центрифуг в  $j$ -й ступени каскада, шт.
- $C^+_j$  – концентрация отбора легкой фракции  $j$ -й ступени каскада.
- $G^+_j$  – поток отбора легкой фракции  $j$ -й ступени каскада, г/с.
- $C_j$  – концентрация отбора тяжелой фракции  $j$ -й ступени каскада.
- $G^-_j$  – поток отбора тяжелой фракции  $j$ -й ступени каскада, г/с.
- $G_j$  – поток питания  $j$ -й ступени каскада, г/с.
- $g_j$  – поток питания  $j$ -й ступени каскада на одну ГЦ, мг/с.
- $E_{\text{эфф}j}$  – эффективная разделительная способность  $j$ -й ступени, г/с.
- $E_{\text{факт}j}$  – фактическая разделительная способность  $j$ -й ступени, г/с.
- $E_{\text{ГЦ}j}$  – разделительная способность ГЦ  $j$ -й ступени, мг/с.
- $\eta_{\text{сх}j}$  – схемный КПД  $j$ -й ступени, %.
- $\eta_{\text{Г}j}$  – гидравлический КПД  $j$ -й ступени, %.
- $E_{\text{эфф}}$  – эффективная разделительная способность каскада, г/с.
- $E_{\text{факт}}$  – фактическая разделительная способность каскада, г/с.
- $\eta_{\text{сх}}$  – схемный КПД каскада, %.
- $K_{\text{им}}$  – коэффициент использования разделительной мощности каскада, %.

$\varepsilon_c$  – точность расчета концентрации отбора легкой фракции на последней ступени каскада.

$\varepsilon_T$  – точность расчета дополнительного потока питания при его оптимизации.

$a_0, a_1, a_2, a_3$  – модельные коэффициенты разделительной характеристики ГЦ.  
 $b_0, b_1$  – модельные коэффициенты гидравлической характеристики ГЦ по трассе отбора тяжелой фракции.

$k_0, k_1$  – модельные коэффициенты гидравлической характеристики ГЦ по трассе питания.

$h_i$  – шаг по потоку отбора тяжелой фракции ступени в численной оптимизации, г/с.

$s_i$  – направление шага в численной оптимизации по ступеням.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей : учебное пособие / Г.А. Сулаберидзе, В.А. Палкин, В.Д. Борисевич и др. ; под ред. В.Д. Бормана. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2011. – 368 с.
2. Измаилов А.Ф. Численные методы оптимизации : учебное пособие / А.Ф. Измаилов, М.В. Солодов. – Москва : Физматлит, 2005. – 304 с.
3. Изотопы: свойства, получение, применение. В 2 томах. Том 1 / под ред. В.Ю. Баранова. – Москва : Физматлит, 2005. – 600 с.
4. Палкин В.А. Определение оптимальных параметров каскада газовых центрифуг / В.А. Палкин // Атомная энергия. – 1998. – Т. 84, № 3. – С. 246–253.
5. Палкин В.А. Оптимизация каскада при произвольно заданных коэффициентах разделения ступеней / В.А. Палкин // Атомная энергия. – 1997. – Т. 82, № 4. – С. 295–301.
6. Базара М. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы / М. Базара, К. Шетти ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1982. – 583 с.
7. Палкин В.А. Компьютерная программа «Каскад газовых центрифуг» : руководство пользователя / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков. – Екатеринбург : Инприс, 2005. – 25 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	1
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	4
1.1. Основные расчетные соотношения .....	4
1.2. Критерии и параметры оптимизации .....	6
1.3. Оптимизация потока отбора тяжелой фракции каскада .....	7
1.4. Оптимизация дополнительного потока питания каскада .....	8
1.5. Подбор количества ступеней и точки подачи питания .....	8
1.6. Подбор количества ГЦ в ступени .....	9
1.7. Оптимизация потоков закрутки .....	9
1.8. Расчет характеристик эффективности разделения ступеней .....	10
1.9. Расчет характеристик эффективности разделения каскада .....	10
2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ .....	11
2.1. Требования к системе .....	11
2.2. Особенности интерфейса .....	11
2.3. Ввод основных параметров каскада .....	14
2.4. Ввод дополнительных параметров расчета каскада .....	15
2.5. Особенности ввода данных .....	15
2.6. Расчет каскада .....	16
2.7. Настройки программы .....	16
2.8. Просмотр результатов расчета каскада .....	17
2.9. Работа с результатами расчета каскада .....	17
2.10. Подготовка к работе .....	18
3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	19
Требования по оформлению отчета .....	19
Примеры оформления таблиц и графиков .....	21
Практическое занятие 1. Изучение описания программного обеспечения для расчета каскадов и проведение тестовых расчетов .....	32
Практическое занятие 2. Определение оптимального номера ступени подачи основного потока питания для каскада постоянной ширины .....	33
Практическое занятие 3. Влияние модельных коэффициентов разделительной характеристики газовых центрифуг на параметры каскада постоянной ширины .....	35

Практическое занятие 4.	
Влияние потоков закрутки на ступенях отбора тяжелой и легкой фракций на параметры каскада постоянной ширины .....	38
Практическое занятие 5.	
Влияние дополнительного питания на параметры каскада постоянной ширины .....	41
Практическое занятие 6.	
Влияние количества газовых центрифуг в ступени питания на параметры каскада .....	44
Практическое занятие 7.	
Влияние количества газовых центрифуг в ступени отбора легкой фракции каскада на параметры каскада .....	46
Практическое занятие 8.	
Влияние количества газовых центрифуг в ступени отбора тяжелой фракции каскада на параметры каскада .....	48
Практическое занятие 9.	
Автоматический подбор количества газовых центрифуг в ступенях каскада .....	51
Практическое занятие 10.	
Влияние концентрации потока отбора тяжелой фракции на параметры каскада постоянной ширины .....	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	57
СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	58
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	60

Учебное издание

ОРЛОВ Алексей Алексеевич  
ВЕРЛИНСКИЙ Максим Вадимович

# **ТЕОРИЯ ПРОТИВОТОЧНО-СИММЕТРИЧНЫХ КАСКАДОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ УРАНА**

Учебно-методическое пособие

Корректурa *Е.Л. Тен*  
Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*  
Дизайн обложки *А.И. Сидоренко*

Подписано к печати 14.09.2021. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать CANON. Усл. печ. л. 3,66. Уч.-изд. л. 3,31.  
Заказ 163-21. Тираж 100 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ