

Регенерацию предусматривается реализовать на укрупненной лабораторной установке для переработки урансодержащих остатков, которые накопились в течение многих лет. Это позволит отказаться от закупки дорогостоящего высокообогащенного урана для мишеней и использовать для этого уран, оставшийся от переработки облученных мишеней. Учитывая мировую тенденцию отказа от обогащенного урана для наработки ^{99}Mo , ведутся работы по переходу на мишень с низкообогащенным ураном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архангельский Н.В., Третьяков И.Т., Федюлин В.Н. Исследовательские ядерные установки России. М., ОАО «НИКИЭТ», 2012.
2. Кочнов О.Ю. Изотопы в лечебном измерении. — Медицина: целевые проекты, 2011, № 10, с. 28—29.
3. Kochnov O.Yu., Pozdeev V.V. Prospects for the development of Mo-99 production consistent with WWR-C reactor modernization at the branch of FSUE Karpov Institute of Physical Chemistry. — In: Intern. Conf. on Research Reactors. Morocco-2011, p. 60—61.
4. Кочнов О.Ю., Колесов В.В. Влияние бериллиевого отражателя, помещенного в активную зону реактора ВВР-Ц, на ее нейтронно-физические характеристики. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2012, № 2, с. 22—25.
5. Кочнов О.Ю., Дуфлот В.Р., Крашенинников А.И. и др. Генератор технеция (4 варианта). Патент на промышленный образец. — Бюл. «Промышленные образцы», 2011, № 11, с. 50.
6. Кочнов О.Ю., Поздеев В.В., Захаров Н.В., Крашенинников А.И. Производство осколочного молибдена-99 с замкнутым циклом по урану на ядерном реакторе ВВР-Ц. — Радиохимия, 2012, т. 54, № 2, с. 173—177.

Поступила в Редакцию 21.01.14

УДК 621.825.038

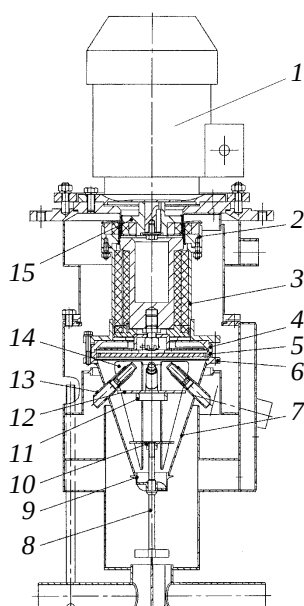
ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ ЭКСТРАКТОРЫ С МАГНИТНОЙ МУФТОЙ ДЛЯ РАДИОХИМИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

*Красильников А.Я. (Уральский федеральный ун-т, г. Екатеринбург),
Политов А.Ю. (ОАО «СвердНИИхиммаш», г. Екатеринбург)*

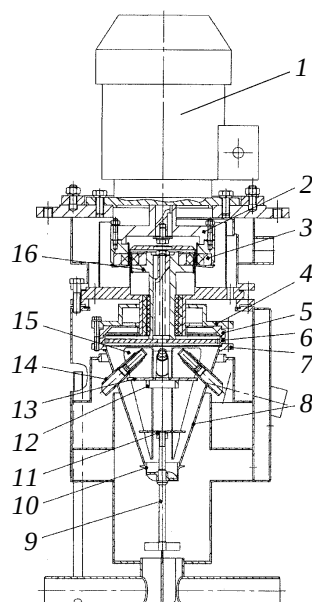
Экстракционные методы являются важной основой технологических процессов на химических и радиохимических предприятиях. Отдельной группой в аппаратном оформлении таких процессов стоят центробежные экстракторы, позволяющие значительно улучшить массообменные характеристики, ускорить и оптимизировать процесс, компактно разместить экстракционное оборудование. Одним из преимуществ экстракторов является также небольшое время контакта рабочего раствора и органического экстрагента. Применение такого оборудования до недавнего времени сдерживалось из-за разрушающего воздействия ионизирующего излучения на уплотнения, смазку и электродвигатель. Поэтому создание центробежных экстракторов, с одной стороны, обладающих высокими массообменными характеристиками, с другой, способных работать в таких условиях является актуальным.

В настоящее время разработаны варианты одноступенчатых центробежных экстракторов, где в качестве привода применен асинхронный электродвигатель, опорные узлы ротора выполнены на подшипниках скольжения из силицированного графита. Герметичность обеспечена применением в приводе магнитной муфты, передающей вращательное движение от ведущей к ведомой полумуфте через разделительную перегородку (экран), отделяющую рабочую полость экстрактора от окружающей среды [1]. При использовании цилиндрической магнитной муфты возможны два варианта конструкции экстрактора. В первом варианте ведущей магнитной полумуфтой является внутренняя, ведомой — наружная полумуфта (рис. 1), во втором наоборот — наружная полумуфта является ведущей, внутренняя — ведомой (рис. 2).

Традиционно в конструкциях герметичных машин и аппаратов ведущей является наружная,



Р и с. 1. Общий вид одноступенчатого экстрактора с магнитной муфтой (основной вариант): 1 — электродвигатель; 2, 15 — ведомая и ведущая магнитная полумуфта соответственно; 3 — стойка; 4 — крышка; 5 — диск; 6 — фланец корпуса; 7 — коническая обечайка; 8 — вал; 9 — нижняя втулка; 10, 11 — втулки; 12 — перегородка; 13 — трубки; 14 — лопатки



Р и с. 2. Общий вид одноступенчатого экстрактора с магнитной муфтой: 1 — электродвигатель; 2 — переходник; 3, 16 — ведущая и ведомая магнитная полумуфта соответственно; 4 — стойка; 5 — крышка; 6 — диск; 7 — фланец корпуса; 8 — коническая обечайка; 9 — вал; 10 — нижняя втулка; 11, 12 — втулки; 13 — перегородка; 14 — трубки; 15 — лопатки

ведомой — внутренняя полумуфта. В конструкциях герметичных экстракторов, рассматриваемых в настоящей статье, выбран основной вариант с расположением магнитных полумуфт, отличный от традиционного.

Рассмотрим основные параметры, которые характеризуют надежную работу экстрактора с компоновкой магнитных полумуфт цилиндрической муфты по варианту, показанному на рис. 1. В качестве приводного применен асинхронный электродвигатель марки АИР71В4УЗ со следующими характеристиками:

Номинальная мощность, Вт . . .	750
Частота вращения, с ⁻¹ :	
синхронная n_c . . .	25
номинальная $n_{ном}$. . .	22,5
Отношение максимального момента электродвигателя к номинальному . . .	2,2
Электродвигатель:	
номинальный момент $M_{ном}$, Н·м . . .	5,3
максимальный момент $M_{э, макс}$, Н·м . . .	11,66
момент инерции ротора электродвигателя, кг·м ² . . .	0,0014
Максимальный передающий момент магнитной муфты $M_{макс}$, Н·м . . .	16,6

Основным показателем надежной работы машины или аппарата с магнитной муфтой считается максимальный угол рассогласования полумуфт, который должен быть меньше $0,5\pi$ рад без учета действия тормозного момента экрана и нагрузки на валу экстрактора. Он рассчитывается по выражению

$$\Delta\alpha_{макс} = \frac{0,85}{(I_1/I_2)^{0,6} (M_{макс}/M_{э, макс})^{1,2}}, \quad (1)$$

где I_1 , I_2 — суммарный момент инерции ведущих и ведомых частей, кг·м².

Суммарный момент инерции ведущих частей включает в себя моменты инерции внутренней (ведущей) полумуфты $0,00107$ кг·м² и ротора электродвигателя $0,0014$ кг·м², т.е. $I_1 = 0,00247$ кг·м², ведомых частей, кг·м²: полумуфты (наружной) $0,00672$, стойки $0,01226$, крышки $0,00349$, диска $0,00345$, фланца корпуса $0,0044$, конической обечайки $0,00273$, перегородки $0,000114$, двух втулок $0,000014$ и $0,0000286$, нижней втулки $0,0000294$, трубок

0,00047, лопаток 0,00166, т.е. $I_2 = 0,03536 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Моменты инерции вала и мешалок приняты равными нулю. Подставив значения в уравнение (1), получим максимальный угол рассогласования $\Delta\alpha_{\text{макс}} = 2,75 \text{ рад} = 0,874\pi \text{ рад}$. Анализируя данный результат, можно прийти к выводу, что во время разгона экстрактора (прямой пуск) произойдет рассогласование полумуфт и муфта не будет передавать крутящий момент, поскольку $\Delta\alpha_{\text{макс}} > 0,5\pi \text{ рад}$.

Для предотвращения рассогласования полумуфт пуск асинхронного электродвигателя осуществляется с помощью регулятора, позволяющего плавно изменять частоту тока для предотвращения проскальзывания ведущей полумуфты (внутренней) относительно наружной. При этом критический момент электродвигателя остается постоянным. Максимальный угол рассогласования полумуфт при таком разгоне рассчитывается по выражению

$$\Delta\alpha_{\text{макс}} = \arcsin M_{\text{э,макс}}/M_{\text{макс}} = \arcsin 11,66/16,6 = 0,779 \text{ рад} = 0,25\pi \text{ рад}. \quad (2)$$

Во время работы экстрактора полумуфты вращаются, разделительная перегородка (экран) стоит на месте. Под действием переменного магнитного поля в экране наводятся вихревые токи, что приводит к потере мощности 129 Вт в токопроводящем слабомагнитном экране P_3 из стали 12X18H10T [2].

Тормозной момент токопроводящего экрана рассчитывается по формуле

$$M_3 = 0,159 P_3/n_{\text{ном}} = 0,159 \cdot 129/22,5 = 3,38 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Увеличение максимального угла рассогласования полумуфт при действии тормозного момента экрана рассчитывается по выражению

$$\Delta\alpha_3 = 0,125 M_3/M_{\text{ном}} = 0,125(3,38/5,3) = 0,08 \text{ рад} = 0,025\pi \text{ рад}. \quad (3)$$

Во время разгона экстрактора на валу возникает вентиляторный момент $M_{\text{наг}}$, который должен быть меньше или равен номинальному моменту электродвигателя, т.е. примем $M_{\text{наг}} = M_{\text{ном}}$.

Увеличение максимального угла рассогласования полумуфт при действии вентиляторного

момента на валу экстрактора рассчитывается по выражению

$$\Delta\alpha_{\text{наг}} = 0,27 \frac{M_{\text{наг}}}{M_{\text{ном}}(1,2)^L} = \frac{0,27}{1,2^{3,13}} = 0,153 \text{ рад} = 0,049\pi \text{ рад}, \quad (4)$$

где $L = M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}} = 16,6/5,3 = 3,13$.

Максимальный угол рассогласования полумуфт с учетом уравнений (2), (3), (4)

$$\Delta\alpha'_{\text{макс}} = \Delta\alpha_{\text{макс}} + \Delta\alpha_3 + \Delta\alpha_{\text{наг}} = 0,779 + 0,08 + 0,153 = 1,012 \text{ рад} = 0,322\pi \text{ рад}. \quad (5)$$

Максимальный угол рассогласования полумуфт, рассчитанный по уравнению (5), не превышает $0,5\pi \text{ рад}$, т.е. разрыва магнитной связи между полумуфтами во время разгона экстрактора не произойдет.

В случае использования традиционной конструкции экстрактора (см. рис. 2) суммарный момент инерции ведущих частей включает в себя момент инерции наружной (ведущей) полумуфты $0,00672 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, переходника $0,00492 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и ротора электродвигателя $0,0014 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, т.е. $I_1 = 0,01304 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Суммарный момент инерции ведомых частей $I_2 = 0,02622 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Максимальный угол рассогласования полумуфт рассчитывается по выражению (1) без учета действия тормозного момента экрана и нагрузки на валу экстрактора $\Delta\alpha_{\text{макс}} = 0,846 \text{ рад} = 0,27\pi \text{ рад}$. Увеличение угла, рассчитанное по выражениям (3), (4), совпадает. Максимальный угол рассогласования полумуфт при прямом пуске без использования регулятора частоты составит

$$\Delta\alpha'_{\text{макс}} = \Delta\alpha_{\text{макс}} + \Delta\alpha_3 + \Delta\alpha_{\text{наг}} = 0,846 + 0,08 + 0,153 = 1,079 \text{ рад} = 0,343\pi \text{ рад},$$

что обеспечивает безотказную работу экстрактора во время разгона $\Delta\alpha'_{\text{макс}} < 0,5\pi \text{ рад}$.

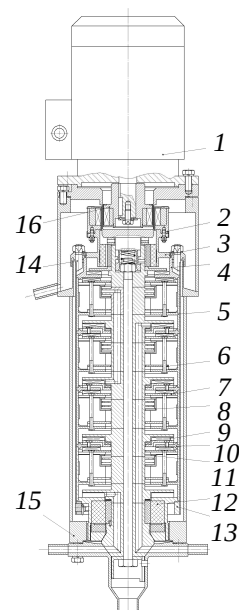
Конструкция экстрактора на рис. 1 по сравнению с показанной на рис. 2 имеет меньшие габариты, подшипник скольжения, закрепленный в стойке, имеет максимально возможные размеры. Два этих фактора были доминирующими при выборе конструкции для последующего изготовления и испытания в производственных условиях. Предложенная конструкция одноступенчатого экстрактора (см. рис. 1) испы-

тана на одном из предприятий и находится в опытно-промышленной эксплуатации. За время работы экстрактора отказов из-за выхода из строя магнитной муфты не наблюдалось.

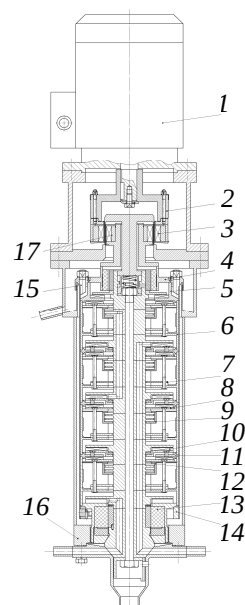
Среди центробежных следует особо выделить многоступенчатые экстракторы. Они представляют собой несколько ступеней (ячеек) экстракции, расположенных на одном валу. Многоступенчатые центробежные экстракторы до недавнего времени не применялись в радиохимической промышленности. Преимуществом многоступенчатого экстрактора по сравнению с одноступенчатыми [3], соединенными между собой последовательно, является отсутствие системы передачи жидкостей и растворов из одной ступени в другую с помощью трубопроводов, за счет чего можно повысить чистоту раствора. Ступени располагаются вертикально на одном валу, в результате упрощается конструкция экстрактора, следовательно, становится экономически более выгодной. Одновременно следует отметить существенное уменьшение числа приводов (электродвигателей) в экстракционной установке, особенно если схема состоит из большого числа ступеней.

Разработаны варианты многоступенчатых центробежных экстракторов, где в качестве привода применен асинхронный электродвигатель, опорные узлы ротора выполнены на подшипниках скольжения из силицированного графита. Герметичность экстрактора достигается применением в приводе магнитной муфты, которая передает вращательное движение от ведущей ведомой полумуфты через разделительную перегородку (экран), герметично отделяющую рабочую полость экстрактора от окружающей среды [1].

При использовании цилиндрической магнитной муфты в конструкции экстрактора возможны два варианта (аналогично одноступенчатому экстрактору). В первом варианте ведущей магнитной полумуфтой является внутренняя, ведомой — наружная полумуфта (рис. 3). Во втором варианте, наоборот, наружная полумуфта является ведущей, внутренняя — ведомой (рис. 4).



Р и с. 3. Общий вид многоступенчатого экстрактора с магнитной муфтой (основной вариант): 1 — электродвигатель; 2, 16 — ведомая и ведущая магнитная полумуфта соответственно; 3 — стойка; 4 — крышка; 5 — вставка; 6 — крестовина; 7 — диск; 8 — стакан; 9 — разделитель; 10 — диск; 11 — кольцо; 12 — подшипник; 13 — кольцо; 14 — стяжка; 15 — обойма



Р и с. 4. Общий вид многоступенчатого экстрактора с магнитной муфтой: 1 — электродвигатель; 2 — ступица; 3, 17 — ведущая и ведомая магнитная полумуфта соответственно; 4 — стойка; 5 — крышка; 6 — вставка; 7 — крестовина; 8 — диск; 9 — стакан; 10 — разделитель; 11 — диск; 12 — кольцо; 13 — подшипник; 14 — кольцо; 15 — стяжка; 16 — обойма

В конструкциях герметичных многоступенчатых экстракторов выбран основной вариант, отличный от традиционного. Рассмотрим ос-

новные параметры, характеризующие надежную работу экстрактора с компоновкой магнитных полумуфт цилиндрической муфты по варианту, показанному на рис. 3. В качестве приводного применен асинхронный электродвигатель марки АИР100S4У3 со следующими характеристиками:

Номинальная мощность, Вт . . .	3000
Частота вращения, с ⁻¹ :	
синхронная n_c . . .	25
номинальная $n_{ном}$. . .	23,5
Отношение максимального момента электродвигателя к номинальному . . .	2,2
Электродвигатель:	
номинальный момент $M_{ном}$, Н·м . . .	20,3
максимальный момент $M_{э, макс}$, Н·м . . .	44,65
момент инерции ротора электродвигателя, кг·м ² . . .	0,0087
Максимальный передающий момент магнитной муфты $M_{макс}$, Н·м . . .	37,39

Исследованиями установлено, что прямой пуск оборудования с магнитной муфтой и асинхронным электродвигателем может быть осуществлен с передающим крутящим моментом магнитной муфты, рассчитанным по выражению [1, 4]

$$M_{макс} = 1,7 M_{ном} = 1,7 \cdot 20,3 = 34,51 \text{ Н·м.} \quad (6)$$

Основным показателем надежной работы машины или аппарата с магнитной муфтой считается максимальный угол рассогласования полумуфт, который должен быть меньше $0,5\pi$ рад.

Максимальный угол рассогласования полумуфт магнитной муфты рассчитывается по выражению (1) без учета действия тормозного момента экрана и нагрузки на валу экстрактора. В уравнении (1) известны следующие величины: $M_{макс} = 37,39$ Н·м [передающий крутящий момент муфты больше рассчитанного по уравнению (6)]; $M_{э, макс} = 44,65$ Н·м; $\Delta\alpha_{макс} = 1,57$ рад. Решив уравнения (1), найдем $I_1/I_2 = 0,513$, т.е. при $I_1/I_2 \geq 0,513$ экстрактор с магнитной муфтой должен работать надежно.

Суммарный момент инерции ведущих частей включает в себя моменты инерции внутренней (ведущей) полумуфты $0,00217$ кг·м² и ро-

тора электродвигателя $0,0087$ кг·м², т.е. $I_1 = 0,01087$ кг·м², ведомых частей, кг·м²: полумуфты (наружной) ведомой $0,01244$, фланца (см. рис. 3) $0,01583$, крышки $0,01026$, вставки $0,0152$, крестовины $0,00183$, диска $0,00183$, стакана $0,000404$, второго диска $0,00393$ и кольца $0,00013$, разделителя $0,0022$, второго кольца $0,0081$, стяжек $0,0229$, обоймы $0,01456$, т.е. $I_2 = 0,17437$ кг·м².

Соотношение $I_1/I_2 = 0,01087/0,17437 = 0,06234$, что меньше $0,513$, т.е. при разгоне экстрактора (прямом пуске асинхронного электродвигателя марки АИР100S4У3) произойдет разрыв магнитной связи (будет вращаться только ведущая полумуфта).

Для надежного пуска многоступенчатого экстрактора с асинхронным электродвигателем использовали преобразователь частоты (инвертер) марки OMRON MX2-A4030-E (Япония) со стандартной функцией ограничения крутящего момента. Во время разгона экстрактора управление асинхронным электродвигателем осуществляется преобразователем частоты. Крутящий момент вращения задается не более максимального передающего магнитной муфты. Время разгона экстрактора увеличивается, но при этом сохраняется целостность магнитной связи между полумуфтами.

Конструкция экстрактора на рис. 3 по сравнению с показанной на рис. 4 имеет меньшие габариты, размеры подшипника скольжения, закрепленного в стойке, максимально возможные. Эти факторы сыграли главную роль в выборе конструкции для последующего изготовления и испытания в производственных условиях. Предложенная конструкция многоступенчатого экстрактора прошла испытания на производственном стенде, отказов магнитной муфты не зафиксировано.

Таким образом, конструкции экстракторов с внутренней полумуфтой в качестве ведущей зарекомендовали себя с положительной стороны. Для плавного пуска асинхронного электродвигателя в целях предотвращения разрыва магнитной связи между полумуфтами необходимо использовать регулятор частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников А.Я. Герметичное оборудование. Особенности использования магнитной муфты в конструкциях герметичных машин. Монография. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 300 с.
2. Красильников А.Я., Красильников А.А. Расчет потерь в токопроводящем экране в герметичных машинах и аппаратах при неплотной укладке магнитов в полумуфтах магнитной муфты. — Хим. и нефтегазовое машиностроение, 2011, № 6, с. 17—20.
3. Красильников А.Я., Политов А.Ю. Центробежный экстрактор с магнитной муфтой для химических производств. — Там же, 2013, № 8, с. 9—11.
4. Николаев Е.А., Сухоросов Л.Н., Красильников А.Я. Магнитные муфты для герметичных приводов. Методика расчета. Свердловск, Свердловский химмаш, 1987. 12 с.

Поступила в Редакцию 25.01.14

УДК 621.039.58:556.535.4

ПРОГНОЗ САМООЧИЩЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОЙ В РАЙОНЕ АЭС «ФУКУСИМА-1» (ЯПОНИЯ) ТЕРРИТОРИИ

Кучин Н.Л., Лайкин А.И., Платовских Ю.А. (Крыловский гос. научный центр, г. Санкт-Петербург)

Аварии на объектах использования атомной энергии, сопровождающиеся выходом радиоактивных веществ, как правило, приводят к длительному загрязнению внешней среды, которое в дальнейшем определяет радиоактивное воздействие на человека. В связи с этим важен обоснованный количественный прогноз перераспределения радионуклидов между различными природными объектами и связанные с ним изменения в уровне воздействия. В настоящей статье приведены результаты такого прогноза для района радиоактивного загрязнения возле АЭС «Фукусима-1». В прогнозе учтены специфические особенности, главным из которых является интенсивный смыв радионуклидов поверхностным стоком с площади бассейна реки в море.

Наиболее полные данные о радиоактивном загрязнении района АЭС «Фукусима-1» приведены в работе [1], где указаны выброс в атмосферу, осаждение на почву, плотность загрязнения почвы $^{137,134}\text{Cs}$, ^{131}I , $^{129\text{m}}\text{Te}$, $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{90}Sr , $^{238-240}\text{Pu}$. Для некоторых из этих изотопов приведены распределение по глубине почвы, концентрация в воде прибрежной зоны моря и реки Абукума, протекающей по загрязненной территории в районе АЭС, а также донных осадках моря и реки. По сравнению с аварией на Чернобыльской АЭС выброс и максимальная плот-

ность загрязнения ^{137}Cs были почти в 10 раз меньше, 22% выброшенного ^{137}Cs оказалось на суше, остальное унесено в океан [1]. Высокий уровень радиоактивного загрязнения ставит вопрос о необходимости прогноза снижения плотности радиоактивного загрязнения и суммарного содержания радиоактивных элементов на этой территории. Снижение со временем радиоактивного загрязнения территории обусловлено распадом и смывом радионуклидов поверхностным стоком в реку и далее в море. В работах [1, 2] вопрос о необходимости решения подобных задач ставится, однако шаги по их решению не намечены.

Методическая основа прогноза. Прогноз загрязнения может быть основан на модели переноса радионуклидов в системе река—бассейн реки, описанной в работе [3] уравнением для плотности радиоактивного загрязнения бассейна $\sigma = \sigma(y, t)$, которая является функцией времени t и координаты y , отсчитываемой от внешней границы бассейна или его участка:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + (\lambda + \xi)\sigma + \frac{\partial y \Delta \sigma}{\partial y} = q, \quad (1)$$

где λ — постоянная распада радионуклида; $\xi = \xi(t)$ — постоянная времени других возможных процессов (ветровой унос, поступление в