



РАДОН
РОСАТОМ

Доклад на тему:

«Расчёт параметров динамической адсорбции радона на основании послойной гамма-спектрометрии сорбента»

Докладчик:

Чепурнов А.С.

Сергиев Посад 2023

РАДОНОВАЯ ПРОБЛЕМА

- Сопутствующей угрозой хранилищ РАО, содержащих Ra-226 , является газообразный продукт его распада – Rn-222 , проникающий через неплотности и трещины в стенках контейнеров в окружающую среду, из-за чего такие хранилища представляют потенциальную **радоновую опасность** для персонала, что выражается увеличением риска заболевания **раком лёгкого**.
- Разработка сорбционных систем для **удаления радона**, а также исследование сорбционно-фильтрующих материалов, невозможны без надёжной и воспроизводимой **методики расчёта параметров адсорбции радона**.

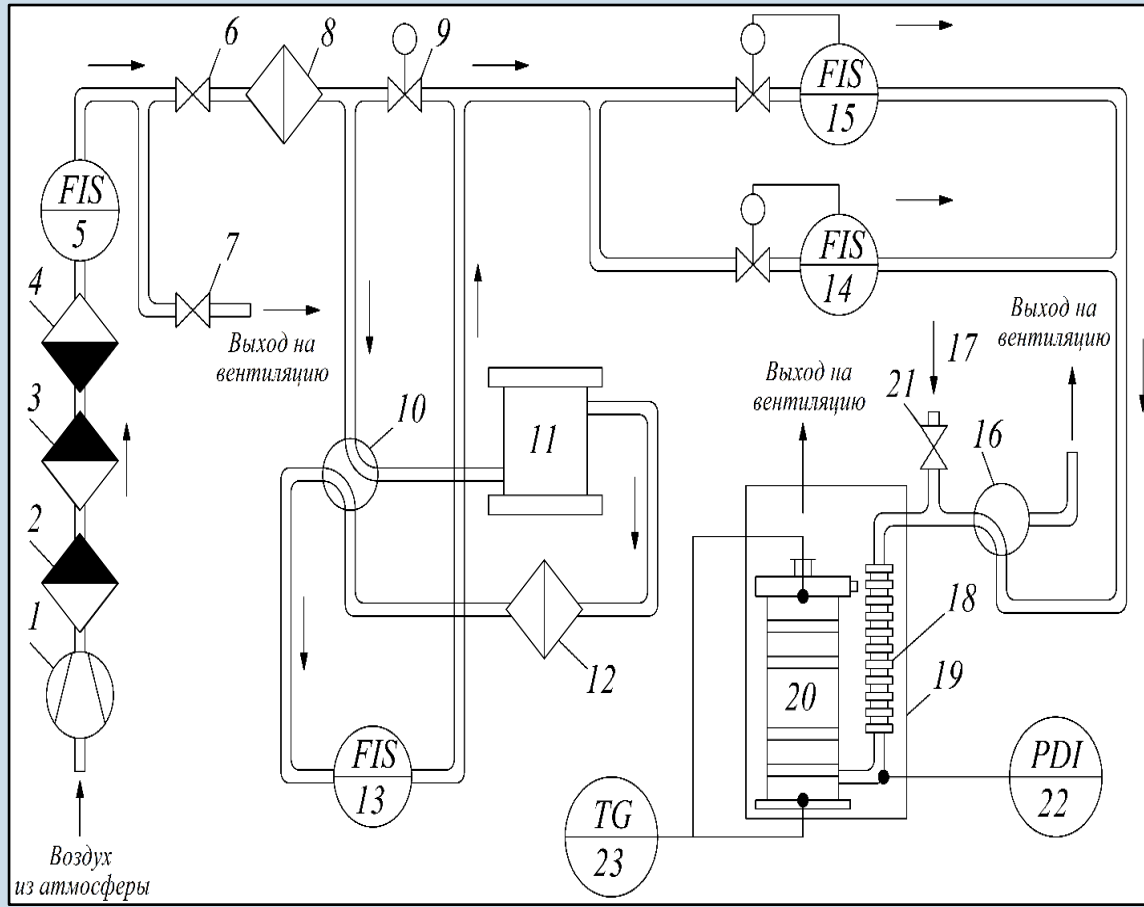
ПОДХОД К ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

- Для определения параметров динамической адсорбции традиционно используется метод выходных кривых. Однако в случае радиоактивных адсорбтивов его применение сопровождается некоторыми трудностями, связанными с необходимостью использования достаточно большой объёмной активности адсорбтива, а также с влиянием его продуктов распада на форму выходной кривой.
- Удачной альтернативой является метод послойного измерения сорбента при импульсном режиме ввода адсорбтива с последующим измерением скорости счёта одного из его продуктов распада.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

- Создать экспериментальный лабораторный стенд для изучения динамической адсорбции радиоактивных адсорбтивов.
- Разработать алгоритм расчёта параметров динамической адсорбции радиоактивных адсорбтивов при импульсном режиме подачи по результатам послойной радиометрии сорбента.

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АДСОРБЦИИ ИЗОТОПОВ РАДОНА



1 – компрессор; 2,3 – колонки с сигнальным силикагелем; 4 – колонка с активированным углём; 5 – поплавковый ротаметр большого расхода LZM-6Т с диапазоном расхода от 1.0 до 12.0 л/мин; 6 – двухходовой кран на систему; 7 – двухходовой кран на атмосферу; 8,12 – механический фильтр тонкой очистки; 9 – игольчатый кран-регулятор тонкой настройки; 10 – четырёхходовой кран; 11 – генератор Rn-220 с оксидом тория; 13 – поплавковый ротаметр расхода воздуха через генератор Rn-220 LZM-4Т с диапазоном расхода от 0.1 до 1.0 л/мин; 14 – электронный ротаметр MV-302 с диапазоном расхода 0,02 – 2 л/мин; 15 – электронный ротаметр MV-304 с диапазоном расхода 0,04 – 20 л/мин; 16 – двухходовой кран L-образный кран; 17 – точка ввода Rn-222 из изотопного генератора; 18 – металлический теплообменник; 19 – суховоздушный термостат; 20 – секционированная сорбционная колонка; 21 – кран на генератор Rn-222; 22 – точка измерения перепада давления в колонке; 23 – электронный термометр.

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АДСОРБЦИИ ИЗОТОПОВ РАДОНА



ИЗОТОПНЫЙ ГЕНЕРАТОР Rn-222

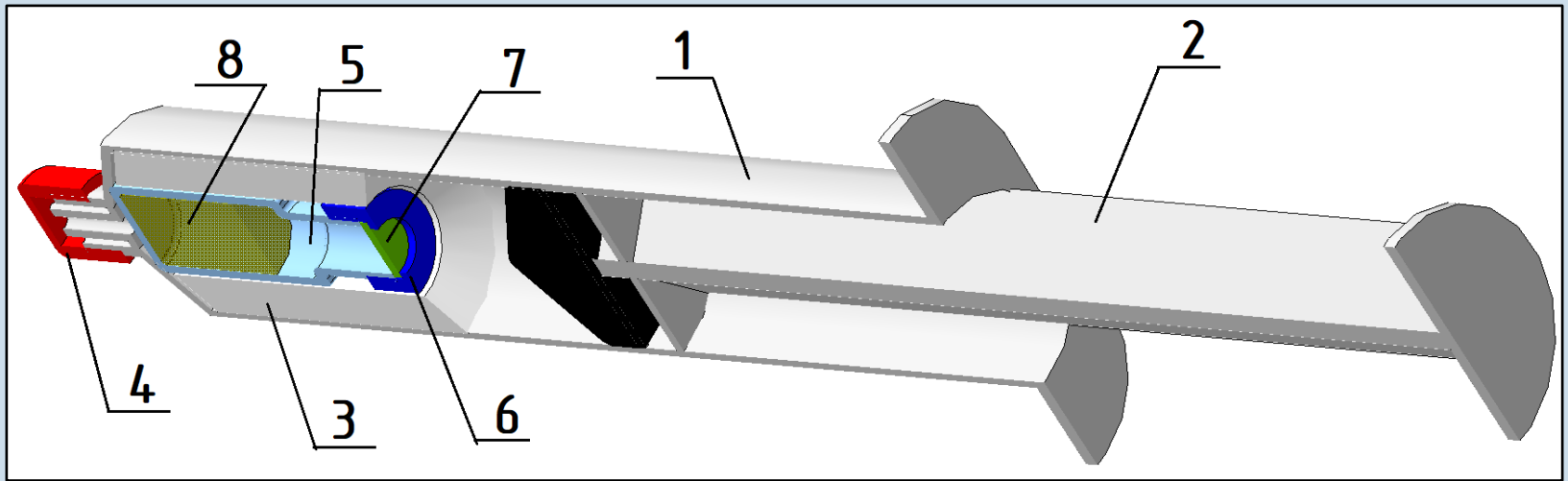


Схема изотопного генератора Rn-222.

1 – корпус (медицинский шприц объёмом 30 см³); 2 – поршень шприца; 3 – фторопластовая вставка; 4 – герметичный колпачок; 5 – стеклянный флакон объёмом 2 см³; 6 – крышка флакона; 7 – пористая мембрана; 8 – катионит КУ-2-8 с Ra-226.

АДСОРБЦИОННАЯ КОЛОНКА

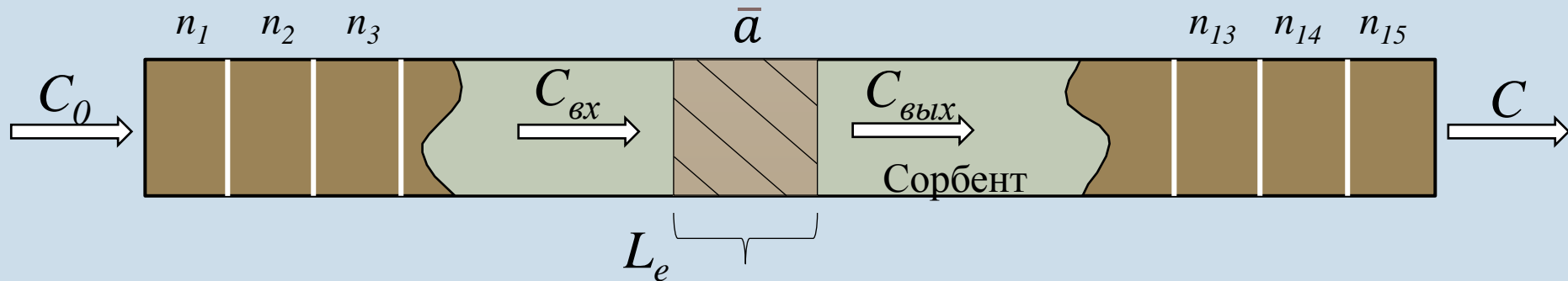


Адсорбционная колонка в разобранном (а) и собранном (б) виде.

МОДЕЛЬ СЛОЯ РАВНОВЕСНОЙ АДСОРБЦИИ

- В качестве методики расчёта параметров динамической адсорбции (константы Генри K_H и толщины слоя равновесной адсорбции L_e) был использован разработанный нами алгоритм на основе модели слоя равновесной адсорбции.

Схема сорбционной колонки



- Уравнение, характеризующие равновесную адсорбцию в таком слое, представлено изотермой Генри:

$$\bar{a} = K_H \cdot c_{\text{вых}}$$

L_e – толщина слоя равновесной адсорбции;

\bar{a} – средняя величина адсорбции в таком слое;

n_j – номер секции колонки.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДОНА В СЛОЕ СОРБЕНТА

$$a(x, t) = c_0 \cdot K_H \cdot e^{-bt} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\left(\Psi \left(i + \frac{x}{L_e} \right) - \ln(b \cdot t) \right) \cdot (b \cdot t)^{i + \frac{x}{L_e} - 1}}{\Gamma \left(i + \frac{x}{L_e} \right)},$$

$$b = \frac{u}{L_e \cdot (\varepsilon + (1 - \varepsilon) \cdot K_H)},$$

где $a(x, t)$ – теоретическая функция распределения скорости счёта радона в слое сорбента;

K_H – константа Генри;

L_e – толщина слоя равновесной адсорбции;

$\Gamma(z)$ – гамма-функция Эйлера;

Ψ – дигамма функция (производная натурального логарифма гамма-функции);

u – кажущаяся (отнесённая к полному сечению слоя) линейная скорость потока;

ε – доля внешнего свободного объёма в слое сорбента.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДОНА ПО СЕКЦИЯМ РАЗБОРНОЙ КОЛОНКИ

- **Аналитическое выражение**, позволяющее рассчитать теоретическое распределение адсорбированного радона в колонке:

$$A_T(n) = \left[\frac{\Gamma\left(\frac{n \cdot h}{L_e}, b \cdot t\right)}{\Gamma\left(\frac{n \cdot h}{L_e}\right)} - \frac{\Gamma\left(\frac{(n-1) \cdot h}{L_e}, b \cdot t\right)}{\Gamma\left(\frac{(n-1) \cdot h}{L_e}\right)} \right] \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{L}{L_e}\right)}{\Gamma\left(\frac{L}{L_e}, b \cdot t\right)},$$

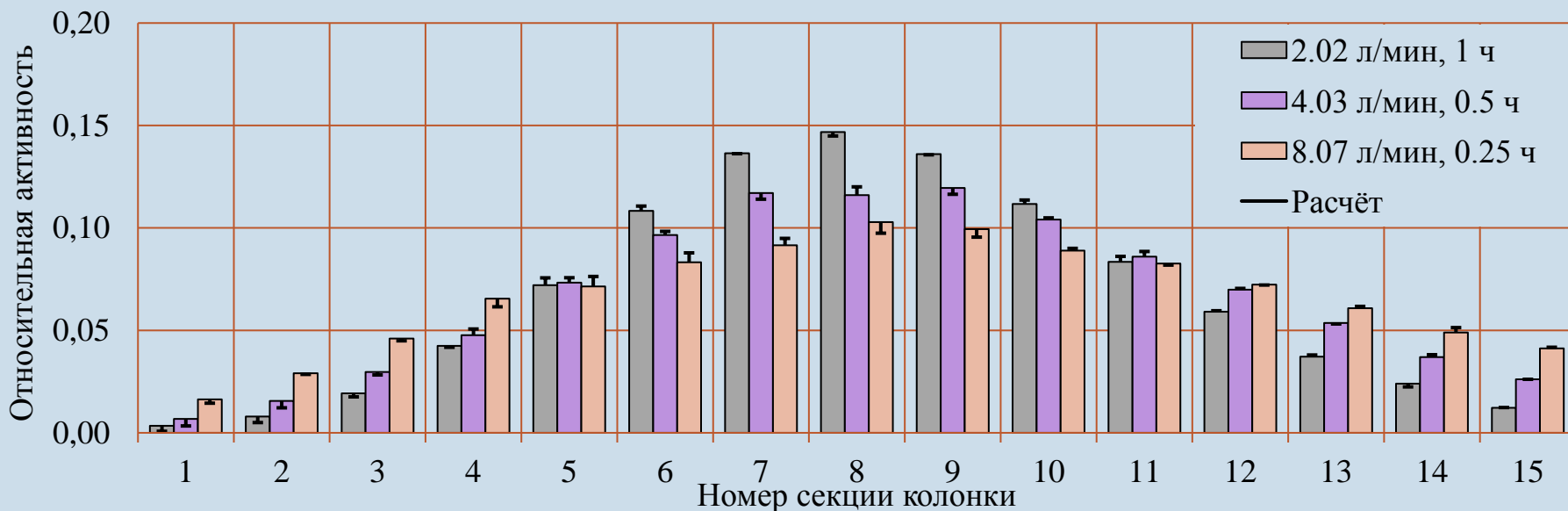
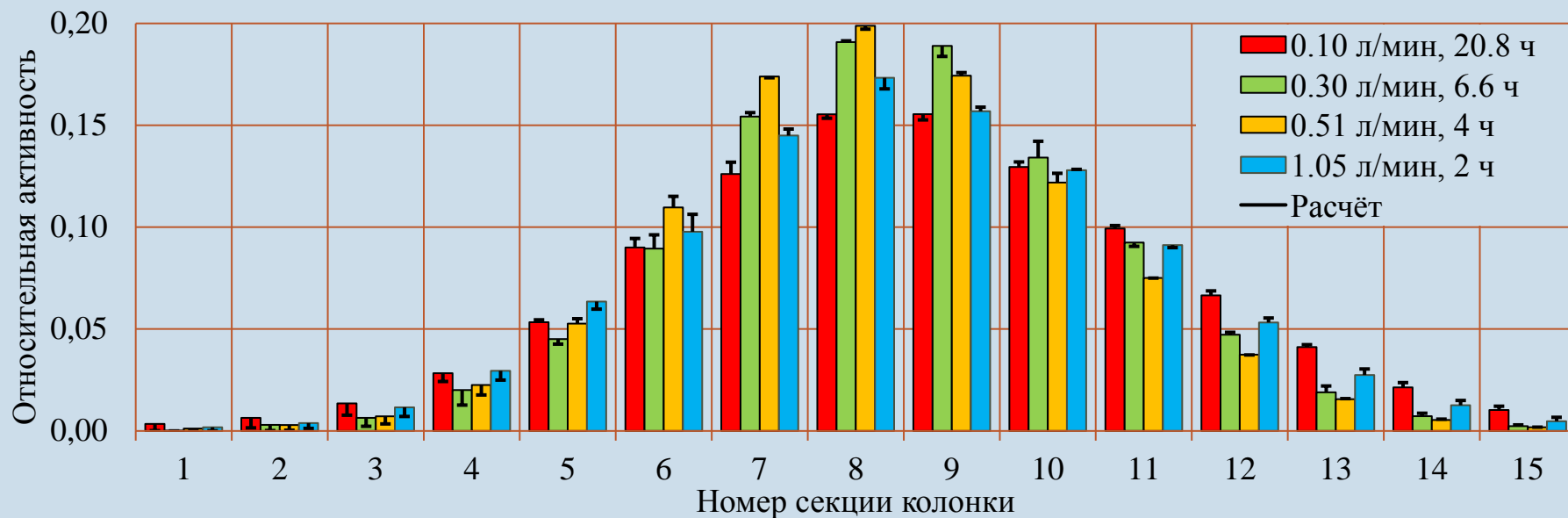
где $A_T(n)$ – теоретически рассчитанная относительная активности n -ой секции колонки;

h – толщина слоя сорбента в каждой секции;

$\Gamma(x, z)$ – верхняя неполная гамма-функция.

- **Минимизация рассогласования** теоретического (A_T) и экспериментального распределения приведёт к значениям **константы Генри** (K_H) и к **толщины слоя равновесной адсорбции** (L_e).

ГИСТОГРАММЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДОНА-222



ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА ГАЗА НА ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ АДСОРБЦИИ(30°C)

№	Уголь	Экспозиция, мин	v, л/мин	u, см/мин	K _H	L _e , см
1	АГ-3	1248	0.096	5.2	1 274	0.954
2		396	0.303	16.2	1 290	0.610
3		240	0.513	27.4	1 377	0.613
4		120	1.046	55.5	1 365	0.836
5		60	2.025	109.2	1 379	1.191
6		30	4.033	214.8	1 328	1.832
7		15	8.067	428.9	1 324	3.364
Среднее:					1 334 ± 42	
8	СКТ-3	110	1.992	105.4	2 481	0.764
9		55	4.000	214.5	2 411	1.213
10		37	6.005	319.7	2 506	1.460
11		26	7.982	428.1	2 488	1.766
Среднее:					2 472 ± 42	
12	ВСК-5	2440	0.102	5.4	3 519	0.979
13		1235	0.200	10.7	3 700	0.629
14		1260	0.201	10.6	3 701	0.647
15		140	1.998	106.8	3 700	1.065
16		70	3.992	212.9	3 587	1.644
17		33	7.997	427.4	3 654	2.326
18		27	9.981	530.2	3 719	2.870
Среднее:					3 654 ± 75	
19	NWC	300	0.999	52.6	4 207	0.500
20		75	3.996	214.4	4 206	0.669
21		50	5.980	315.3	4 200	0.791
22		30	9.997	528.6	4 360	0.993
Среднее:					4 243 ± 78	

ЗАВИСИМОСТЬ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ РАВНОВЕСНОЙ АДСОРБЦИИ L_e ОТ ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА

- Толщина слоя равновесной адсорбции L_e и ВЭТТ (высота эквивалентной теоретической тарелки) близки по физическому смыслу. Как и ВЭТТ, параметр L_e может служить показателем эффективности работы слоя сорбента и описывается уравнением Ван Деемтера:

$$L_e = A + \frac{B}{u} + C \cdot u$$

где A, B, C – коэффициенты, учитывающие вклад вихревой, продольной диффузии и массоперенос соответственно;

u – кажущаяся (отнесённая к полному сечению слоя) линейная скорость потока

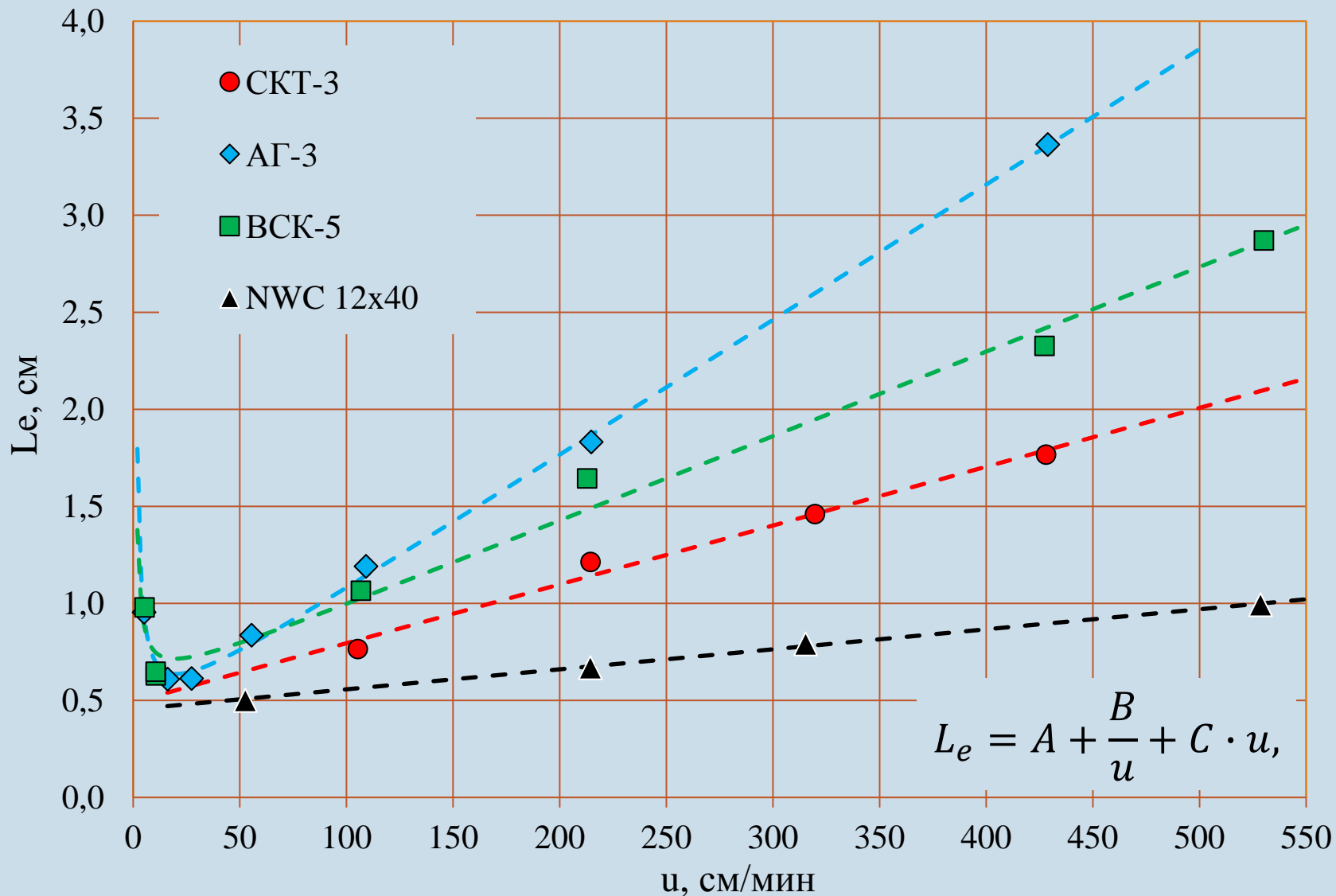
РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТОВ УРАВНЕНИЯ ВАН ДЕЕМТЕРА

- Расчёт **коэффициентов** уравнения Ван Деемтера позволит определять параметр L_e для любой скорости потока в колонке при заданной температуре процесса.

Коэффициент	АГ-3	СКТ-3	ВСК-5	NWC
A	0.35	0.49	0.55	0.45
B	2.86	-	1.65	-
C	$7.0 \cdot 10^{-3}$	$3.0 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$

- Эксперименты при **малых линейных скоростях** проводились только для углей марок АГ-3 и ВСК-5, поэтому значение коэффициента B было рассчитано только для них.

ЗАВИСИМОСТЬ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ РАВНОВЕСНОЙ АДСОРБЦИИ L_e ОТ ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА



ВЫВОДЫ

1. Был собран лабораторный стенд для изучения динамической адсорбции радона. На основе теории слоя равновесной адсорбции был разработан алгоритм расчёта параметров динамической адсорбции и профиля концентраций Rn-222 в слое сорбента по результатам послойной радиометрии при импульсном введении радона в колонку. Было показано, что предлагаемая модель достаточно хорошо описывает экспериментальные данные.
2. Методом послойной радиометрии сорбента найдены параметры динамической адсорбции радона на марках активированного угля АГ-3, СКТ-3, ВСК-5 и NWC при различной скорости газового потока. Показано, что результаты расчёта константы Генри (K_H) не зависят от скорости потока. Разброс значений не превышал 4%.
3. Показано, что зависимость кинетического параметра адсорбции (L_e) описывается уравнением Ван Деемтера в широком интервале скоростей газового потока. Оптимальная скорость для исследованных марок угля не превышает 20 см/мин.
4. На основании полученных экспериментальных данных методом наименьших квадратов были рассчитаны коэффициенты уравнения Ван Деемтера для динамической адсорбции радона на исследованных углях. Найденные коэффициенты позволяют прогнозировать форму выходных кривых радона, что важно при расчёте систем адсорбционной очистки воздуха от этого газа.
5. Было проведено сравнение кинетической эффективности адсорбции Rn-222 на разных марках активированного угля. Наилучший результат показал уголь марки NWC. Исследованные марки можно расположить в порядке увеличения кинетической эффективности следующим образом: NWC > СКТ-3 > ВСК-5 > АГ-3.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!