

Морданов С.В., Ташлыков О.Л., Хомяков А.П.,  
Ремез В.П., Бессонов И.А., Чалпанов С.В.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ ЖРО

*Аннотация.* Представлены результаты экспериментальных измерений удельного гидравлического сопротивления ионоселективных сорбентов НПП «ЭКСОРБ», предназначенных для очистки ЖРО. Показано, что измеренные значения гидравлического сопротивления отличаются от расчетных по уравнению Эргуна на 25–200 %, при этом погрешность расчета систематическая и определяется заданным размером частиц сорбента. Предложено дополнить уравнение Эргуна корректировочными коэффициентами для фрикционного и динамического слагаемых. Методами регрессионного анализа получены значения корректировочных коэффициентов для рассмотренных сорбентов. Погрешность расчета по модифицированному уравнению Эргуна составляет 4–12 %.

*Ключевые слова:* уплотненный слой, гидравлическое сопротивление, ионоселективные сорбенты, уравнение Эргуна.

*Abstract.* The results of experimental measurements of specific hydraulic resistances of LRW treatment EKSORB sorbents are presented. It is shown that the Ergun equation calculation systematic error for the irregular shape and size particles is about 25-200 % and depends on the particle size. It is proposed to modify Ergun's equation with frictional and dynamical correction coefficients. The values of the EKSORB ion-selective sorbents correction coefficients are defined using the regression analysis. The calculation error of the modified Ergun equation is about 4-12 %.

*Keywords:* packed bed, hydraulic resistance, ion-selective sorbent, Ergun equation

### Введение

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) образуются при работе реакторных установок, дезактивации оборудования, помещений и спецодежды [1]. ЖРО представляют собой гомогенные или гетерогенные смеси (пульпы, эмульсии, суспензии) в кислом или щелочном состоянии. Эксплуатационные ЖРО загрязнены продуктами деления (цезий, стронций, йод), радионуклидами коррозионного происхождения (кобальт, никель, марганец), веществами, используемыми для поддержания водно-химического режима и дезактивации оборудования [2], [3].

Радиоактивные вещества в растворах кубовых остатков находятся в виде ионов, нейтральных молекул и коллоидных частиц. Основными радионуклидами в кубовых остатках являются  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ . Для изотопов цезия характерна ионная форма нахождения. Радионуклиды кобальта и марганца в

кубовых остатках находятся в форме комплексов с соединениями, которые используются для дезактивации оборудования (щавелевая, муравьиная, лимонная и этилендиаминтетрауксусная (ЭДТА) кислоты).

Основной задачей при обращении с ЖРО является окончательная изоляция кондиционированных РАО. Среди методов кондиционирования наибольшее сокращение объемов ЖРО происходит при селективной сорбции. Это определяет её преимущества и позволяет сконцентрировать радионуклиды в небольшом объеме сорбента [4].

Процесс очистки ЖРО на установке ионоселективной очистки (ИСО) включает в себя: предварительную фильтрацию и подготовку исходного раствора, озонирование, фильтрацию и селективную сорбцию на ферроцианидных сорбентах в фильтрах-контейнерах (ФК). Конечными продуктами переработки являются очищенный от радионуклидов солевой раствор, отработавший сорбент в ФК, шлам с фильтров, образующийся в результате озонирования (объемная активность находится на уровне исходных ЖРО) [5].

Высокая вариативность сорбционных свойств и селективности к различным радионуклидам, а также возможность менять физико-химические параметры сорбентов в зависимости от требований конкретного технологического процесса, позволяют эффективно решать вопросы очистки ЖРО практически любого состава.

В качестве аппаратного оформления процессов ионоселективной очистки, сорбции и ионного обмена часто применяется различное технологическое оборудование с уплотненным слоем (колонны, фильтры). Одной из основных задач при расчете или подборе такого оборудования является определение гидравлического сопротивления уплотненного слоя.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления ферроцианидных сорбентов НПП «ЭКСОРБ» СМЕТ, РАЦИР и МОДИКС, и сравнение результатов экспериментальных измерений гидравлического сопротивления слоев сорбентов с результатами расчета с использованием классических инженерных методик.

### **Методики расчета гидравлического сопротивления уплотненного слоя**

Технологические среды в оборудовании с уплотненным слоем часто движутся в ламинарном режиме, при этом значение критерия Рейнольдса может составлять 1–10 и даже меньше. Одной из основных проблем расчета таких потоков является определение гидравлического сопротивления. В ламинарном режиме течения потери напора определяются как затратами на создание скорости потока (динамической составляющей), так и трением между слоями жидкости и на границе жидкости и частиц уплотненного слоя (фрикционной составляющей).

Коэффициент гидравлического сопротивления при этом не является постоянной величиной и с ростом значения критерия Рейнольдса обычно существенно снижается [6–8]. Зависимость гидравлического сопротивления уплотненного слоя от скорости потока через данный слой может быть установлена экспериментально или с помощью различных, часто полуэмпирических, расчетных методов [9–11].

Наиболее широкое распространение в практике, как классических инженерных расчетов, так и численного моделирования методами вычислительной гидродинамики (англ. – *CFD, Computational Fluid Dynamics*), получили методики расчета гидродинамических эффектов, основанные на использовании уравнений Дарси-Форххаймера [12–14]. Одна из таких методик была предложена в 1952 г. С. В. Эргуном для расчета гидравлического сопротивления насадочных колонн [9]. По уравнению Эргуна удельное гидравлическое сопротивление слоя насадки (или уплотненного слоя) рассчитывают следующим образом:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\mu(1-\xi)^2}{d_p^2 \xi^3} u_{eff} + \frac{1.75\rho(1-\xi)}{d_p \xi^3} u_{eff}^2, \quad (1)$$

где  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление, Па;  $L$  – высота слоя насадки (уплотненного слоя), м;  $\mu$  – вязкость жидкой фазы, движущейся через уплотненный слой, Па·с;  $\xi$  – порозность уплотненного слоя;  $d_p$  – характерный размер частицы уплотненного слоя, м;  $u_{eff}$  – эффективная скорость потока через уплотненный слой (отнесенная к полному поперечному сечению аппарата), м/с;  $\rho$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>.

В тех случаях, когда частицы уплотненного слоя имеют нерегулярные размеры и (или) неправильную форму, порозность слоя непостоянная по его высоте или радиусу, а также в других специальных случаях уравнение Эргуна может быть модифицировано с использованием различных, часто чисто эмпирических, коэффициентов [6–8]. Идельчик приводит уравнение Эргуна в безразмерном виде [15]:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d_p} \frac{\rho u_{eff}^2}{2} = \left( \frac{A}{Re} + B \right) \frac{L}{d_p} \frac{\rho u_{eff}^2}{2}, \quad (2)$$

$$Re = \frac{u_{eff} d_p \rho}{\mu}, \quad (3)$$

где  $A$  и  $B$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от формы, размеров и структуры поверхности частиц уплотненного слоя;  $\lambda$  – коэффициент трения.

В нашей работе для расчетного определения гидравлического сопротивления уплотненных слоев ионоселективных сорбентов использовалось уравнение Эргуна (1) в начальном виде [9]. В дальнейшем, после регрессионной обработки результатов измерений, уравнение Эргуна было нами модифицировано с использованием корректировочных эмпирических коэффициентов.

### Экспериментальные материалы, методика и оборудование

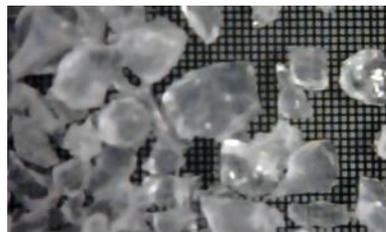
В данной работе мы использовали ферроцианидные ионоселективные сорбенты для очистки ЖРО НПП «ЭКСОРБ» СМЕТ, РАЦИР и МОДИКС. В нашей предыдущей работе экспериментально были определены параметры данных сорбентов, необходимые для расчета по уравнению Эргуна: насыпная и истинная плотности, порозность и средние размеры частиц [16]. Характеристика ионоселективных сорбентов представлена в таблице 1. Микрофотографии сорбентов представлены на рисунке 1. Следует отметить, что представленные сорбенты обладают нетипичными свойствами. Так порозность представленных образцов составляет 0,187–0,234, тогда как обычные значения порозности для сыпучих материалов составляют 0,4–0,5. По нашему мнению, такие низкие величины порозности связаны с нерегулярными размерами и формой частиц сорбентов (см. рисунок 1). Кроме того, частицы рассмотренных образцов имеют склонность к истиранию при транспортировке и хранении и при работе (в особенности для сорбента МОДИКС).

Таблица 1 – Свойства сорбентов НПП «ЭКСОРБ»

Параметр	Ионоселективный сорбент			Погрешность измерений
	СМЕТ	РАЦИР	МОДИКС	
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1320	1092	959	11,1 %
Порозность	0,214	0,187	0,234	12,5 %
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1681	1343	1252	17,1 %
Средний размер частиц, мм	0,9	0,8	1,4	7,1 %



а)



б)



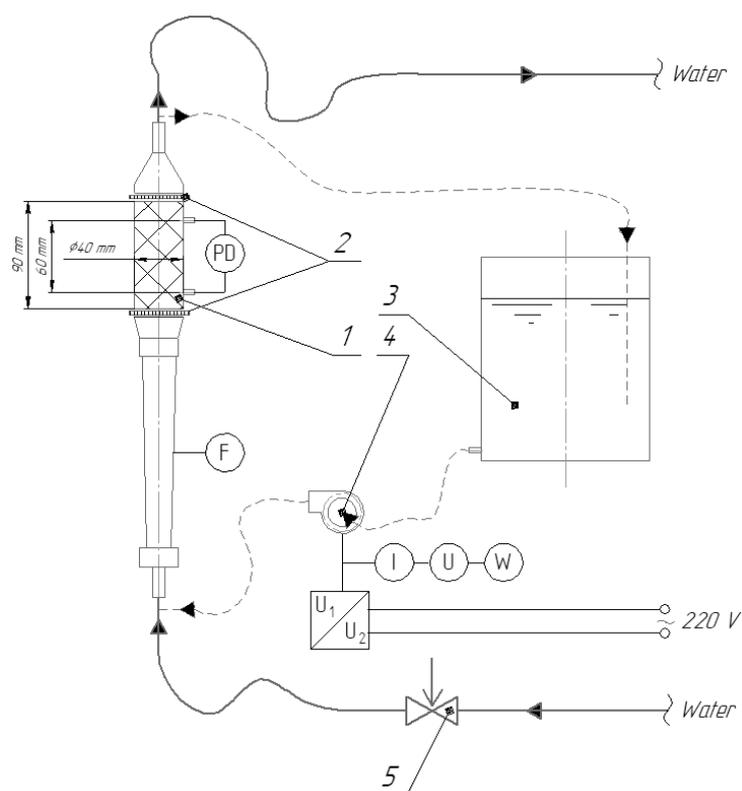
в)

Рисунок 1 – Микрофотографии сорбентов НПП «ЭКСОРБ»: а) СМЕТ, б) РАЦИР, в) МОДИКС

Для измерения удельного гидравлического сопротивления представленных ионоселективных сорбентов использовали лабораторную установку, представленную на рисунке 2. Лабораторная установка состоит из заполненной сорбентом измерительной колонны 1, фильтров 2, бака 3, центробежного насоса 4, вентиля 5, дифференциального манометра  $PD$ , расходомера (ротаметра)  $F$ , амперметра  $I$ , вольтметра  $U$ , ваттметра  $W$  и преобразователя напряжения переменного тока  $U_1/U_2$ . Лабораторная установка может работать в двух режимах: на воде из водопроводной сети (сплошные линии на рисунке 2) или на воде из бака 3 (пунктирные линии на рисунке 2). В первом случае управление расходом осуществляется с помощью вентиля 5, во втором – напряжением переменного тока, подающегося на центробежный насос 4. Установка работает следующим образом. Вода поступает на установку из водопроводной сети или из бака 3, проходит через расходомер  $F$  и измерительную колонну 1 и отводится в канализацию или обратно в бак 3. При этом расход воды фиксируется расходомером  $F$ , а снижение напора на уплотненном слое сорбента – дифференциальным манометром  $PD$ . Характеристики измерительных приборов лабораторной установки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики измерительных приборов

Измеряемая величина	Измерительный прибор	Цена деления	Пределы измерений	Погрешность измерений
Перепад давления	Дифференциальный манометр НТ-1890	0,1 см вод. ст.	0-140,6 см вод. ст.	0,3 %
Расход воды	Ротаметр LZS-15	5 л/ч	10–100 л/ч	$\pm 2,5$ л/ч
Электрическое напряжение	Электрическое измерительное устройство РЗЕМ-021	1 В	80–260 В	1,0 %
Сила тока		0.01 А	0–20 А	
Электрическая мощность		0.1 Вт	0–999 Вт	

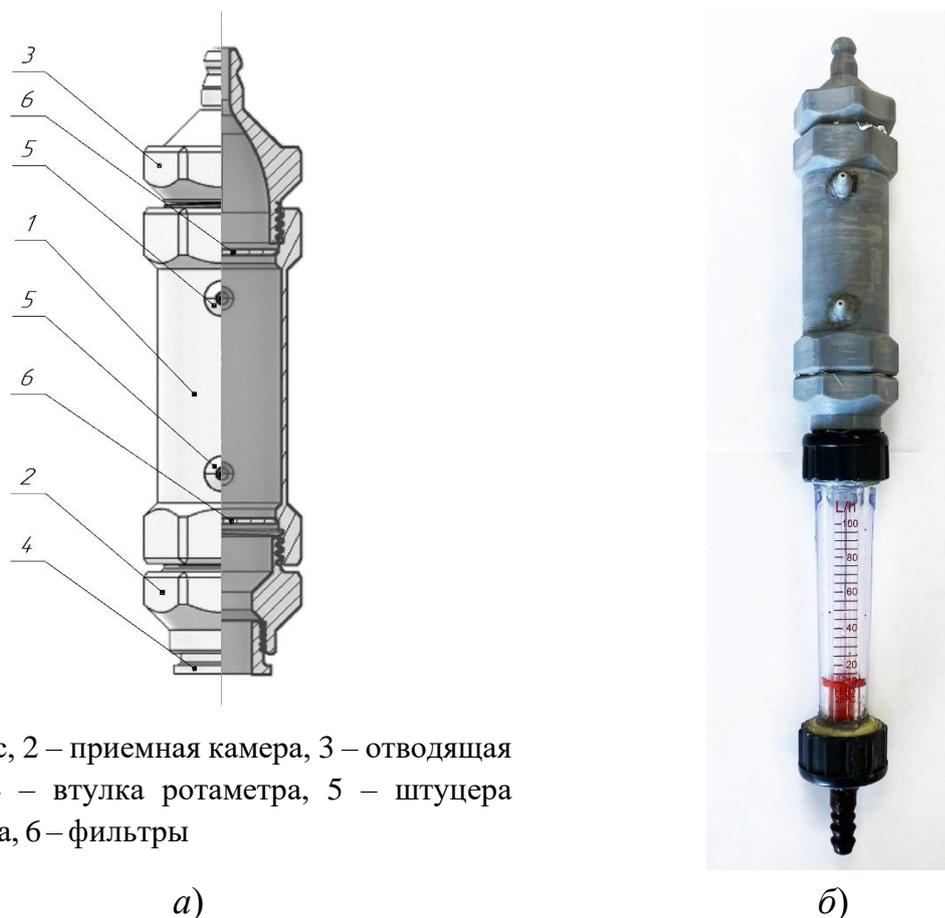


1 – измерительная колонна, 2 – фильтры, 3 – бак, 4 – центробежный насос, 5 – вентиль, PD – дифференциальный манометр, F – расходомер (ротаметр), I – амперметр, U – вольтметр, W – ваттметр,  $U_1/U_2$  – преобразователь напряжения переменного тока

Рисунок 2 – Лабораторная установка для измерения гидравлического сопротивления уплотненных слоев.

Внутренний диаметр измерительной колонны 1 составляет 40 мм, расстояние между штуцерами дифференциального манометра (высота уплотненного слоя сорбента) – 60 мм. Измерительная колонна 1 и фильтры 2 изготовлены методом FDM-3D-печати (послойной экструзии) из полиэтилентерефталата. Размер пор фильтров 2 составляет 0,2 мм. Эскиз и фотография измерительной колонны представлены на рисунке 2.

Внутренний диаметр колонны выбирали таким, чтобы эффективная скорость в сечении колонны в заданных диапазонах расходов воды соответствовала эффективной скорости ЖРО в промышленных технологических сорбционных аппаратах. Совместная компоновка измерительной колонны использовалась для снижения гидравлического сопротивления установки. Ранее [16, 17] использовалась измерительная колонна с внутренним диаметром 40 мм и расстоянием между штуцерами дифференциального манометра 705 мм. Однако из-за низкой порозности представленных образцов сорбентов гидравлическое сопротивление уплотненного слоя высотой более 800 мм существенно превышало пределы измерений дифференциального манометра PD.



1 – корпус, 2 – приемная камера, 3 – отводящая камера, 4 – втулка ротаметра, 5 – штуцера манометра, 6 – фильтры

Рисунок 2 – Измерительная колонна: а) эскиз, б) фотография (с ротаметром)

Кроме того ни центробежный насос 4, ни (в меньшей мере) напор водопроводной сети не могли обеспечить стабильный расход воды через измерительную колонну с расстоянием между штуцерами манометра 705 мм.

В итоге при пуске установке с колонной [16, 17] от водопроводной сети произошло выдавливание прокладок колонны [16, 17], а после дополнительных мер по герметизации колонны – разрушение стенки колонны в месте соединения со втулкой промежуточного фланца. В связи с этим для вновь изготовленной измерительной колонны 2 (рисунок 2, б) толщина стенки по цилиндрической части была увеличена с 1 до 2,5 мм, фланцевые соединения заменены резьбовыми соединениями, а клеевые соединения штуцеров дифференциального манометра с корпусом колонны – сварными соединениями.

Кроме того, из-за относительно высокого гидравлического сопротивления уплотненных слоев рассмотренных сорбентов и, с одной стороны, необходимости обеспечения стабильных малых расходов воды через колонну и, с другой стороны, работы в диапазоне измерений дифференциального манометра пределы изменения расходов воды через уплотненный слой сорбента были скорректированы до следующих значений:

- для сорбента СМЕТ: 60–100 л/ч;
- для сорбента РАЦИР: 20–60 л/ч;
- для сорбента МОДИКС: 60–100 л/ч.

Измерения производили при температуре воды 20–25 °С, температуре воздуха в лаборатории 17–22 °С. Для каждого режима работы выполняли пять параллельных измерений. Статистическую обработку результатов измерений осуществляли методом Стьюдента [18–20]. Значения критерия Стьюдента  $t$  принимали также по [18–20] с доверительными вероятностями:

- для сорбентов СМЕТ и РАЦИР – 0,9 ( $t = 1,476$ );
- для сорбента МОДИКС – 0,85 ( $t = 1,746$ ).

По результатам статистической обработки отбраковки результатов измерений не потребовалось.

### **Результаты и обсуждение**

На рисунке 3 представлены зависимости гидравлических сопротивлений сорбентов СМЕТ (рисунок 3, а), РАЦИР (рисунок 3, б) и МОДИКС (рисунок 3, в) при высоте слоя 60 мм, полученные в результате обработки экспериментальных данных и расчетным путем по уравнению Эргуна (1).

По результатам статистической обработки средняя полная погрешность измерений составляет:

- для сорбента СМЕТ – 6,7 % (3,4 см вод. ст.);
- для сорбента РАЦИР – 4,7 % (2,4 см вод. ст.);
- для сорбента МОДИКС: – 10,3 % (4,4 см вод. ст.).

Совместный анализ результатов измерений и расчетов гидравлического сопротивления представленных образцов показывает, что средние и максимальные погрешности расчета по уравнению Эргуна (1) существенно превышают полную погрешность измерений и составляют соответственно:

- для сорбента СМЕТ – 263 % и 370 %;
- для сорбента РАЦИР – 227 % и 294 %;
- для сорбента МОДИКС: – 26,6 % и 54,8 %.

В абсолютных значениях измеренные значения удельного гидравлического сопротивления уплотненных слоев для сорбентов существенно ниже измеренных:

- для сорбента СМЕТ – на 110–16 см вод. ст.;
- для сорбента РАЦИР – на 48–202 см вод. ст.;
- для сорбента МОДИКС – на 3–15 см вод. ст.

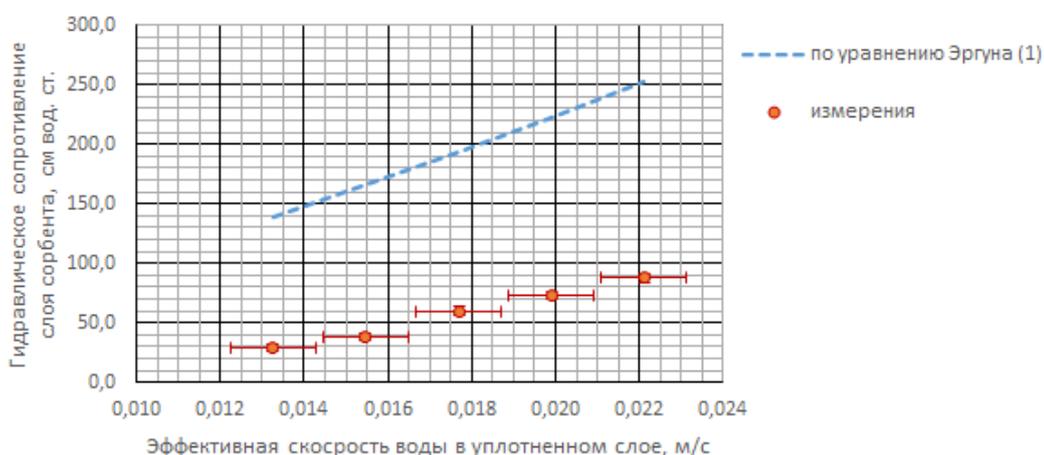
Таким образом, использование уравнения Эргуна в исходном виде (1) для расчета гидравлического сопротивления при проектировании или подборе

технологического оборудования для отчистки ЖРО с помощью рассмотренных ионоселективных сорбентов НПП «ЭКСОРБ» невозможно.

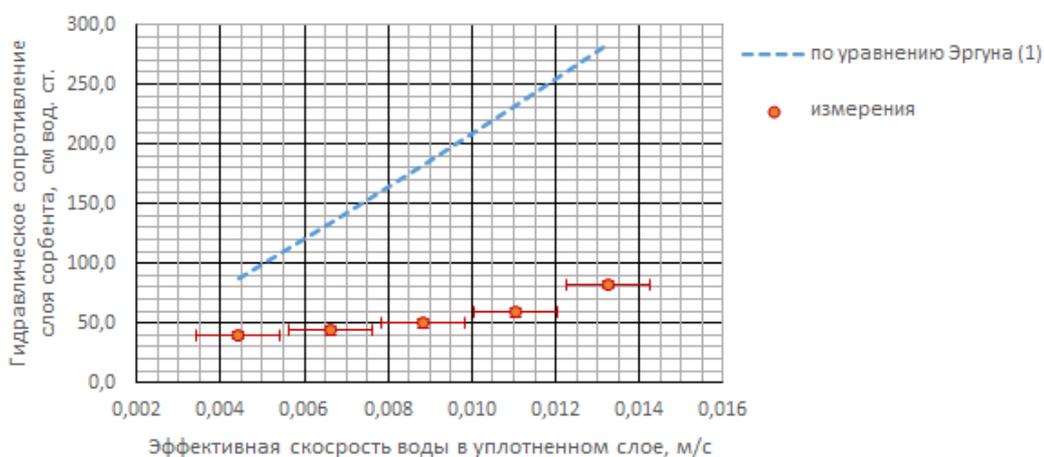
Причинами высокой погрешности расчета по уравнению (1), на наш взгляд являются:

- достаточно широкий диапазон размеров частиц рассмотренных образцов даже для относительно точно определенных средних размеров частицы уплотненного слоя сорбента – 7,1 % ( $\pm 0,06-0,09$  мм);
- неправильная форма частиц сорбентов (см. рисунок 1);
- истирание частиц сорбентов.

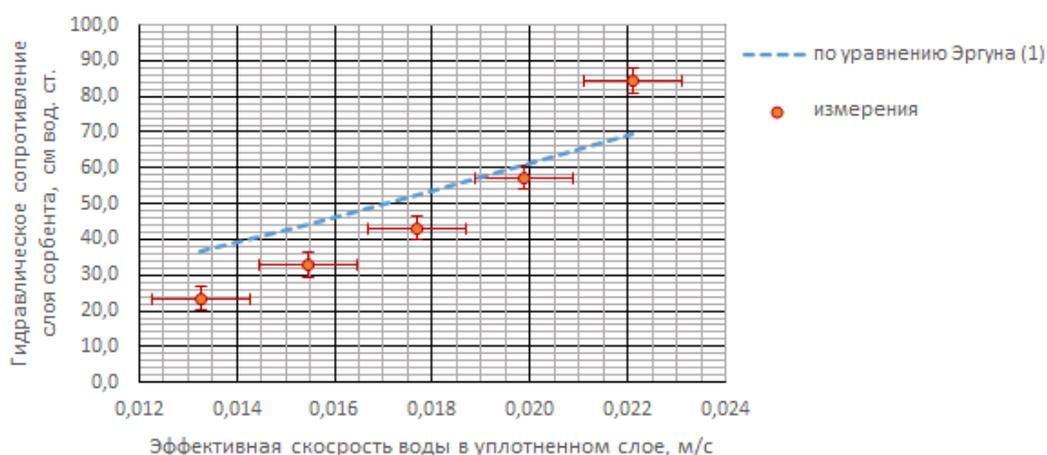
Истирание частиц сорбентов было отмечено как во время хранения (в особенности для сорбента МОДИКС), так и во время работы. Следует отметить, что после проведения серий испытаний на каждом сорбенте проходило промывать фильтры и даже ротаметр, так как продукты истирания перекрывали часть ячеек фильтров и зазор между стенкой корпуса и поплавком ротаметра.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Расчетные и измеренные зависимости гидравлического сопротивления сорбентов НПП «ЭКСОРБ» от эффективной скорости в уплотненном слое: а) СМЕТ, б) РАЦИР, в) МОДИКС

При этом, налипания частиц сорбента на стенки колонн и ротаметра во влажном и сухом состоянии не происходило (измерительная колонна, как отмечалось ранее, изготовлена из полиэтилентерефталата, корпус ротаметра – из полиметилметакрилата).

Все расчетные зависимости гидравлического сопротивления слоев сорбентов от эффективной скорости воды в уплотненном слое являются практически линейными. То есть, согласно методике Эргуна, в рассмотренных диапазонах эффективных скоростей в слое сорбента фактором, лимитирующим гидравлическое сопротивление должно являться трение слоев воды друг о друга и о поверхность частиц сорбента. По результатам измерений такая ситуация характерна только для сорбента СМЕТ (рисунок 3, а). Для сорбентов РАЦИР и МОДИКС хорошо заметен переход к турбулентному режиму течения: для сорбента РАЦИР – при эффективной скорости в уплотненном слое 0,011–0,012 м/с; для сорбента МОДИКС – при эффективной скорости в уплотненном слое 0,019–0,020 м/с.

Следует заметить, что критерий Рейнольдса из расчета по размеру частицы [15] при этом совершенно не коррелирует с поведением зависимости гидравлического сопротивления уплотненного слоя от условной скорости. Для сорбента РАЦИР в переходной области расчетный критерий Рейнольдса составляет 8,0–8,6; для сорбента МОДИКС – 25,0–27,5; для сорбента СМЕТ при «ламинарной» картине течения во всем рассмотренном диапазоне условных скоростей критерий Рейнольдса для частицы меняется в диапазоне 10,6–17,7.

Таким образом, по крайней мере для уплотненных слоев с частицами неправильной формы и нерегулярного размера, критерий Рейнольдса для частицы (как и для характерного сечения аппарата по условной скорости) не может являться объективным универсальным критерием, позволяющим судить о режиме течения жидкости через уплотненный слой.

Погрешность расчета удельного гидравлического сопротивления по уравнению Эргуна (1) носит систематический характер и зависит от заданных размеров частиц уплотненного слоя. На рисунке 4 представлены измеренная и расчетные зависимости гидравлического сопротивления слоя сорбента СМЕТ от условной скорости воды в уплотненном слое. Расчетные зависимости получены для следующих заданных размеров частицы сорбента: 0,9 мм (измеренный размер); 1,2 мм; 1,5 мм; 1,8 мм. Наиболее близкие измеренные и расчетные значения гидравлического сопротивления соответствуют заданному расчетному размеру частицы 1,5 мм. Данный эффект не может быть обусловлен только погрешностью измерения размеров частиц, так как полная погрешность измерений для данного параметра составляет 7,1 % (см. таблицу 1) или 0,06 мм в абсолютном выражении.

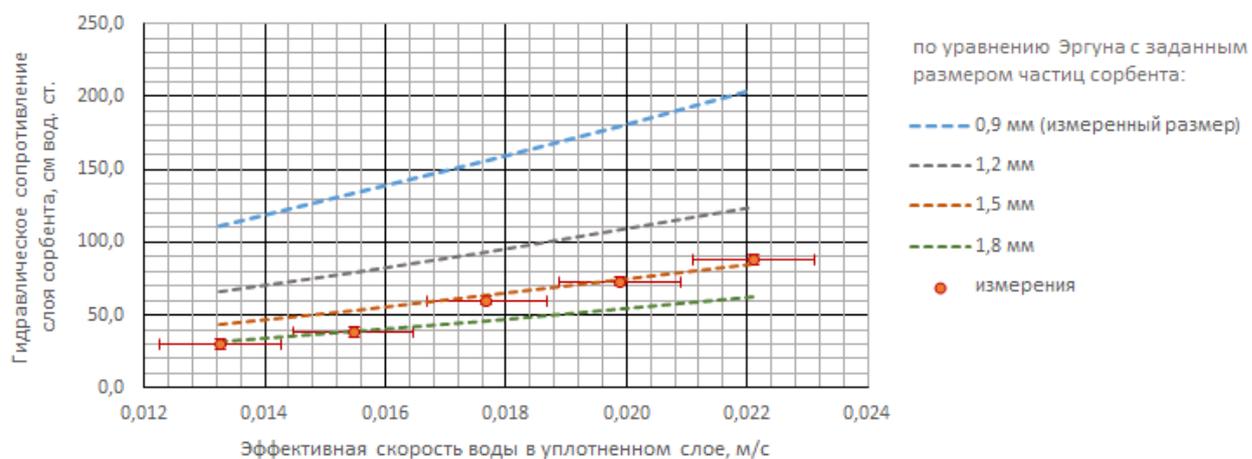


Рисунок 4 – Расчетные и измеренная зависимости гидравлического сопротивления сорбентов СМЕТ от эффективной скорости в уплотненном слое для разных заданных расчетных размеров частиц сорбента

Таким образом, показано, что погрешность вычислений при использовании уравнения Эргуна (1) для уплотненных слоев с частицами неправильной формы и нерегулярными размерами слушком велика и исключает возможность использования уравнения Эргуна (1) для инженерных расчетов. Для осуществления расчетов по конструированию, масштабированию или подбору оборудования для очистки ЖРО с помощью ионоселективных сорбентов НПП

«ЭКСОРБ» предлагается дополнить классическое уравнение Эргуна (1) эмпирическими корректировочными коэффициентами для фрикционной и динамической составляющих:

$$\frac{\Delta p}{L} = C_{fr} \frac{150\mu(1-\xi)^2}{d_p^2 \xi^3} u_{eff} + C_{dyn} \frac{1.75\rho(1-\xi)}{d_p \xi^3} u_{eff}^2, \quad (4)$$

где  $C_{fr}$ ,  $C_{dyn}$  – соответственно фрикционный и динамический корректировочные коэффициенты.

Значения корректировочных коэффициентов для рассмотренных ионоселективных сорбентов были получены методом регрессионного анализа с использованием программного комплекса SciLab. Результаты регрессионного анализа и значения погрешностей аппроксимации (погрешностей расчета по регрессионным уравнениям) представлены в таблице 3. Следует отметить, что для всех рассмотренных сорбентов (в том числе для СМЕТ с «ламинарной» картиной течения, см. рисунок 3, а) и фрикционный и динамический корректировочные коэффициенты являются значимыми.

Погрешность вычислений при использовании полученных уравнений составляет не более 4–12 %. Таким образом полученные уравнения можно использовать в практических инженерных целях.

Таблица 3 – Корректировочные коэффициенты уравнения Эргуна

Параметр	Ионоселективный сорбент		
	СМЕТ	РАЦИР	МОДИКС
Корректирующий фрикционный коэффициент $C_{fr}$	-0,0526	0,4108	-0,7796
Корректирующий динамический коэффициент $C_{dyn}$	1,9228	-0,8379	5,2546
Погрешность аппроксимации	4,3 %	11,5 %	7,4 %

### Заключение

Получены экспериментальные зависимости гидравлического сопротивления уплотненных слоев ионоселективных ферроцианидных сорбентов НПП «ЭСОРБ» СМЕТ, РАЦИР и МОДИКС от условной скорости в уплотненном слое. Показано, что полученные по уравнению Эргуна расчетные гидравлические сопротивления данных сорбентов превышают измеренные в 1,5–3 раза. Таким образом, использование уравнения Эргуна в исходном виде для расчета гидравлического сопротивления при проектировании или подборе технологического оборудования для очистки ЖРО с помощью рассмотренных ионоселективных сорбентов НПП «ЭКСОРБ» невозможно.

Причинами высокой погрешности расчета по уравнению Эргуна, на наш взгляд являются: широкий диапазон размеров частиц, неправильная форма частиц сорбентов, истирание частиц сорбента при хранении и эксплуатации.

Показано, что в отличие от прогноза по уравнению Эргуна, режим течения в уплотненном слое представленных сорбентов в рассмотренном диапазоне эффективных скоростей меняется с ламинарного на переходный или, возможно, турбулентный.

Установлено, что по крайней мере для уплотненных слоев с частицами неправильной формы и нерегулярного размера, критерий Рейнольдса для частицы является объективным универсальным критерием, позволяющим судить о режиме течения жидкости через уплотненный слой.

Показано, что погрешность расчета удельного гидравлического сопротивления по уравнению Эргуна для рассмотренных сорбентов носит систематический характер и зависит от заданных размеров частиц уплотненного слоя.

Предложено дополнить классическое уравнение Эргуна эмпирическими корректировочными коэффициентами для фрикционной и динамической составляющих. Значения корректировочных коэффициентов для рассмотренных ионоселективных сорбентов получены методом регрессионного анализа. Погрешность вычислений при использовании дополненного уравнения Эргуна и найденных эмпирических значений корректировочных коэффициентов составляет не более 4–12 %. Таким образом дополненное уравнение Эргуна может быть использовано в практических инженерных целях.

Показано, что одного только среднего размера частиц в уплотненном слое, без данных о форме частиц и дисперсии их размеров недостаточно для расчета гидравлических сопротивлений уплотненных слоев, как при использовании классических инженерных методик, так и при применении методов вычислительной гидродинамики. В будущих исследованиях необходимо не только определение средних размеров частиц сорбентов или ионообменных смол, но других параметров, характеризующих геометрические параметры частиц.

Для практического использования ионоселективных ферроцианидных сорбентов НПП «ЭСОРБ» рекомендуется разработать технические решения по усреднению размеров и форм частиц сорбентов. В качестве таких решений могут быть предложены механическая обработка частиц готовых сорбентов или решения на стадии синтеза, позволяющие снизить неравномерность размеров и неупорядоченность формы частиц.

### *Библиографический список*

1. Ташлыков О. Л. Эксплуатация и ремонт ядерных паропроизводящих установок АЭС. Учебник. В 2 ч. Ч. 1 / О. Л. Ташлыков, А. Г. Кузнецов, О. Н. Арефьев. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 256 с.
2. Ташлыков О. Л. Ремонт оборудования атомных станций : учебник / О. Л. Ташлыков ; науч. ред. С. Е. Щеклеин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 352 с.
3. Ташлыков О. Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация : монография / О. Л. Ташлыков. – Саарбрюккен : LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 232 с.
4. Метод ионоселективной очистки жидких радиоактивных отходов атомных станций / А. Э. Арустамов, А. В. Зинин, П. В. Красников [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – № 11. – С. 13–16.
5. Повышение эффективности локализации радионуклидов кобальт-60 и цезий-137 из жидких радиоактивных отходов в решении проблемы обеспечения радиационной безопасности АЭС / В. П. Ремез, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 129–137.
6. Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems / W.-Ch. Yang // China Particuology. – 2003. – Vol. 1, Iss. 3. – P. 137.
7. Berk Z. Food Process Engineering and Technology / Z. Berk. – London : Academic Press, 2013. – 742 p.
8. Rhodes M. J. Introduction to Particle technology / M. J. Rhodes. – Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2017. – 472 p.
9. Ergun S. V. Fluid Flow through Packed Columns / S. V. Ergun // Chemical Engineering Progress. – 1952. – Vol. 48. – P. 89–94.
10. Computational Fluid Dynamics: Technologies and Applications / ed. by L. V. Minin, O. V. Minin. – Rijeka : InTech, 2011. – 408 p.
11. Duangkhamchan W. CFD Study of Top-Spray Fluidized Bed Coating Process / W. Duangkhamchan, F. Ronsse, J. G. Pieters // CFD Study of Top-Spray Fluidized Bed Coating Process. – Boca Raton, 2007. – P. 531–560.
12. Determination of Forchheimer Term in Porous Media Consisting of Obstacles of Different Sizes / R. X. Liu, A. Nakayama, X. L. Haung // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 594/597. – P. 2537–2540.
13. Ciomolin F. Navier-Stokes/Forchheimer models for filtration through porous media / F. Ciomolin, M. Discacciati // Applied Numerical Mathematics. – 2013. – Vol. 72. – P. 205–224.
14. Soulaine C. On the use of a Darcy-Forchheimer like model for a macro-scale description of turbulence in porous media and its application to structured packings / C. Soulaine, M. Quintard // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 74. – P. 88–100.
15. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик ; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1992. – 672 с.
16. Investigation of hydrodynamics of motion of solutions in sorption pressure columns /

- A. S. Lavrov, A. P. Khomyakov, S. S. Petsura, S. V. Mordanov [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1886. – P. 020087-1–020087-7.
17. Simulation method of the low-Re flows in the packed bed technological equipment / A. P. Khomyakov, S. Mordanov, A. S. Lavrov, D. I. Grinyov // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862. – P. 062020.
18. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А. Н. Эйдель. – Ленинград : Наука, 1967. – 100 с.
19. Яковлев Г. П. Краткие сведения по обработке результатов физических измерений / Г. П. Яковлев. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2001. – 51 с.
20. Самойлов Н. А. Моделирование в химической технологии и расчет реакторов : учеб. пособие / Н. А. Самойлов. – Уфа : Монография, 2005. – 224 с. – ISBN 5-94920-050-0.