

характеристику (функцию распределения частиц по размерам) твердой фазы пульпы подтвердили адекватность использованной модели и воспроизводимость получаемых результатов.

Выводы. Разработанная автоматизированная система распределенного оптимального управления взаимосвязанными процессами обогащительного производства осуществляет оперативный неразрушающий контроль характеристик перерабатываемого материала на основе комплекса ультразвуковых и радиометрических средств. Результаты испытаний и практической реализации системы свидетельствуют об их высокой эффективности, что позволяет рекомендовать разработанные научно-технические решения для широкого промышленного использования на горных предприятиях.

Список литературы

1. **Марюта А.Н.** Автоматическое управление технологическими процессами обогащительных фабрик / **А.Н. Марюта, Ю.Г. Качан, В.А. Бунько** // М.: Недра, 1983. – 277 с.
2. **Купін А.І.** Узгоджене інтелектуальне керування стадіями технологічного процесу збагачення магнетитових кварцитів в умовах невизначеності / **А.І. Купін**: Автореф. дис. докт. техн. наук // Кривий Ріг, 2010. – 36 с.
3. **Щокін В. П.** Адаптивне керування агломераційним комплексом на основі авторегресійних структур з регуляризациєю : дис. ... докт. техн. наук: 05.13.07 / **Щокін Вадим Петрович** // Кривий Ріг, 2012. – 443 с.
4. Назаренко М. В. Оптимальне управління технологічним процесом залізорудного комбінату на основі прогнозу технологічних показників для підвищення прибутку підприємства : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.13.07 «Автоматизація процесів керування» / **М. В. Назаренко** // К., 2010. - 32 с.
5. **Габасов Р.** Оптимальное децентрализованное управление группой динамических объектов / **Р. Габасов, Н. М. Дмитрук, Ф. М. Кириллова** // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 2008. – том 48, номер 4. – С. 593–609.
6. **Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф.** / Математическая теория оптимальных процессов // М.: Наука, 1969.
7. **Федоренко Р.П.** Приближенное решение задач оптимального управления / М.: Наука, 1978.
8. **Сронко В.А.** Итерационные методы решения задач оптимального управления / М.: Физматлит, 2000.
9. **Hulkó, G., Mikulecký, M.**: Distributed Parameter Model of Liver Dye Excretion. Proc. 1-st Int. Symp. On Mathematical Modeling of Liver Dye Excretion, Bratislava - Smolenice, 1984.
10. **Поркуян О.В.** Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна / **О.В. Поркуян**: Автореф. дис. докт. техн. наук // Кривий Ріг, 2009. - 36 с.
11. **Qi Chenkun.** Modelling of nonlinear distributed parameter system for industrial thermal processes. <http://lbms03.cityu.edu.hk/theses/abt/phd-meem-b23750911a>.

Рукопись поступила в редакцию 31.03.16

УДК 556.012-032.26

А. А. АЗАРЯН, д-р техн. наук, проф., В. В. БАВРОВСКИЙ, аспирант,
Криворожский национальный университет

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЩЕЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ

Рассматриваются современные методы измерения общей минерализации воды. Обосновывается важность контроля общей минерализации воды грунтовых вод. Указывается справочная информация о понятии общей минерализации воды и классификации вод по уровню общей минерализации. Предлагается общая классификация методов измерения общей минерализации воды в соответствии с основными физическими свойствами растворов. Приводится справочная информация о существующих кондуктометрах с погружными электродами и их применимости в зависимости от уровня общей минерализации воды.

Проводится краткий обзор каждого из методов измерения общей минерализации воды. Выполняется анализ их актуальности, особенности применения в процессе проведения автоматизированных исследований текущего состояния гидрорежимных наблюдательных скважин в полевых условиях. Характеризуются достоинства и недостатки каждого из методов измерения общей минерализации воды и способы устранения недостатков. Указываются факторы, которые влияют на процессы измерения общей минерализации воды при использовании разных методов.

Выделяется метод измерения диэлектрической проницаемости водных растворов, развитие которого является наиболее перспективным с точки зрения измерения общей минерализации воды. Рассматривается возможность применения метода измерения диэлектрической проницаемости водных растворов для выяснения химического состава и измерения компонентного содержания растворенных минеральных солей и иных примесей.

Предлагается направление научного поиска путей дальнейшего совершенствования методов измерения общей минерализации воды и их практического применения при исследовании текущего состояния гидрорежимных наблюдательных скважин в полевых условиях, а именно - использование комбинации кондуктометрического метода и резонансного метода измерения диэлектрической проницаемости воды.

Ключевые слова. общая минерализация воды, гидрорежимные скважины, методы измерения, удельная электрическая проводимость, диэлектрическая проницаемость, влияние температуры.

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. Эксплуатация недр и добыча полезных ископаемых в большинстве случаев сопровождается загрязнением окружающей среды, влияет на уровень и минерализацию грунтовых вод. Качественный и своевременный контроль характеристик грунтовых вод является важным инструментом в процессе контроля влияния техногенных факторов на окружающую среду в процессе добычи полезных ископаемых. Значение такого контроля сложно переоценить, поскольку минерализация грунтовых вод прямым образом влияет на качество почв и качество локальных источников воды для питья и орошения.

Вопрос измерения уровня общей минерализации воды далеко не нов. Ему посвящено множество научных работ и исследований [4], которые ведутся с начала XX века. В настоящее время для проведения работ по измерению уровня общей минерализации воды используются массивы гидрорежимных наблюдательных скважин количеством от десятков до сотен скважин. Для качественного контроля состояния гидрорежимных скважин лучше всего подходят методы и их комбинации, не требующие проведения исследования проб воды в лабораторных условиях. Это позволяет сократить время исследования состояния гидрорежимных наблюдательных скважин, повысить точность измерений и их связность во времени.

Анализ исследований и публикаций. Общая минерализация воды – это показатель количества растворенных в воде органических и неорганических химических соединений [1]. Этот показатель также называют общим солесодержанием или содержанием твердых веществ.

Наибольшее влияние на уровень минерализации воды оказывают распространенные неорганические соли – карбонаты, хлориды и сульфаты натрия, кальция, калия, магния и другие.

Органические химические соединения в воде растворяются относительно слабо, поэтому их влияние на уровень минерализации воды невелико.

В соответствии с уровнем общей минерализации принята следующая классификация воды [1].

Таблица 1

Характеристика воды по количеству растворенных веществ

Характеристика воды	Содержание растворенных веществ, г/л
Ультрапресная	<0,2
Пресная	0,2-0,5
Вода с относительно повышенной минерализацией	0,5-1
Солоноватая	1-3
Соленая	3-10
Вода с повышенной соленостью	10-35
Вода, переходная к рассолу	35-50
Рассолы	50-400

Классический метод определения уровня общей минерализации воды выполняется в лабораторных условиях. Суть метода заключается в выпаривании воды и последующем взвешивании сухого остатка.

Для измерения уровня общей минерализации воды существуют также другие методы, которые можно разделить по физическим параметрам, которые исследуются:

- фотометрические методы;
- кондуктометрические методы;
- методы исследования диэлектрической проницаемости;
- методы измерения плотности и другие.

Рассмотрим и проанализируем их подробнее.

Фотометрические методы основываются на измерении оптических свойств воды, минеральных и коллоидных растворов. В частности, к коллоидным растворам относятся растворы, содержащие оксиды металлов.

Для исследования коллоидных растворов используются методы, основанные на эффекте Тиндаля. Данный эффект позволяет измерить рассеивание света при прохождении светового пучка через оптически неоднородную среду, в которой частицы и окружающая их среда различаются по показателю преломления. Эти методы позволяют определить размеры, форму и концентрацию коллоидных частиц и макромолекул. На основе эффекта Тиндаля построены нефте-

лометры – приборы, измеряющие прозрачность среды. Принципиальная оптическая схема промышленного нефелометра представлена на рис. 1. Предполагаемый график зависимости тока фотодетектора от количества коллоидных частиц в растворе представлен на рис. 2.

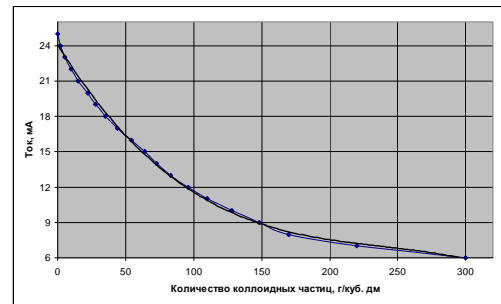
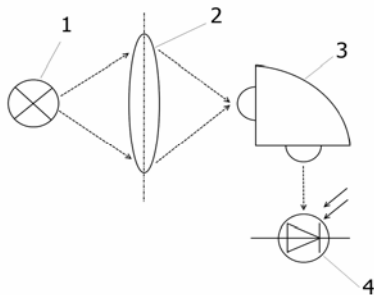


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема промышленного нефелометра. 1 - лампа просвечивания; 2 - линза; 3 - шарообразная кювета с пробой; 4 - фотодетектор

Рис. 2. График зависимости тока фотодетектора от количества коллоидных частиц в растворе

Получено аналитическое выражение предполагаемого отношения зависимости тока I (мА) фотодетектора от количества коллоидных частиц в растворе, ρ г/куб. дм.):

$$I = -10^{-6} \rho^3 + 7 \cdot 10^{-3} \rho^2 - 0,1881 \rho + 24,82 - \text{достоверность аппроксимации } R^2=0,99$$

Для минеральных растворов также возможно измерение уровня минерализации через показатель преломления.

Измерение показателя преломления возможно с помощью рефрактометров.

Известно, что показатель преломления для водно-солевых растворов снижается с ростом уровня минерализации.

Кондуктометрические методы измерения общей минерализации воды основаны на измерении удельной электрической проводимости воды.

Они используют зависимость удельной электропроводности λ раствора от концентрации C_B

$$\lambda = K\alpha(U^+ - U^-) C_B$$

где α - степень диссоциации; U^+ , U^- - подвижность ионов.

Диссоциация - это процесс распада электролита на ионы при его растворении.

Степень диссоциации - это соотношение диссоциированных молекул вещества к общему количеству молекул вещества.

Для сильных электролитов, к которым относится большинство солей неорганических кислот, степень диссоциации высока и приближается к 1.

Удельная электрическая проводимость воды зависит от двух основных факторов - от уровня минерализации воды и от температуры, и измеряется в Сименсах.

Зависимость в обоих случаях - прямо пропорциональная.

Чем выше минерализация и температура, тем выше проводимость.

Последнее нужно учитывать и применять температурную коррекцию измерений.

Выделяют две разновидности кондуктометрических методов [4] - с использованием постоянного и переменного тока, однако предпочтение отдают вторым.

В кондуктометрах применяют измерительные системы: мостовые на переменном токе с температурной компенсацией.

Таблица 2

Кондуктометры с погруженными электродами

Марка	Принцип действия	Пределы измерений сим/см	Тип датчика	Назначение
КК-1	НЧ - дифференциальный	$10^{-6} \div 10^{-3}$	2-х-электродный	Слабые растворы
КК-2 КК-3	НЧ - компенсационный	$10^{-4} \div 10^{-1}$	4-х-электродный	Растворы <1%
КК-4 КК-5	ВЧ - бесконтактный	$10^{-4} \div 10^{-2}$	емкостный	Бесконтактные измерения
КК-6 КК-7	ВЧ - бесконтактный	$10^{-2} \div 1$	магнитная антенна	Для растворов засоренных взвешенными частицами
КК - 8 КК - 9	НЧ - индуктивный	$10^{-2} \div 1$	жидкостный виток между T_c T_n трансф.	Для чистых и загрязненных растворов

Погрешность измерений $\delta=2,5$ % сигнала. НЧ – низкочастотные, ВЧ - высокочастотные.

Кроме того, используются низкочастотные бесконтактные кондуктомеры с трансформаторным преобразователем типа КИП-1, КНЧ-10М и высокочастотный бесконтактный кондуктомер с индуктивной или измерительной ячейкой типа КВЧ-В3. Кондуктомеры ВЧКК (10^{-7} - 10) сим/м, ОК-302, ОН-301 - 3 МГц; 60 дк, 821 А - 7 МГц.

Отдельная группа методов измерения общей минерализации связана с измерением относительной диэлектрической проницаемости воды. В основе этих методов лежит измерение емкости конденсатора, в качестве диэлектрика у которого выступает вода с растворенными в ней веществами.

При использовании данных методов следует учитывать, что диэлектрическая проницаемость воды зависит нескольких факторов.

На рис. 3 на основе данных [2] приведена зависимость относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r воды от температуры T .

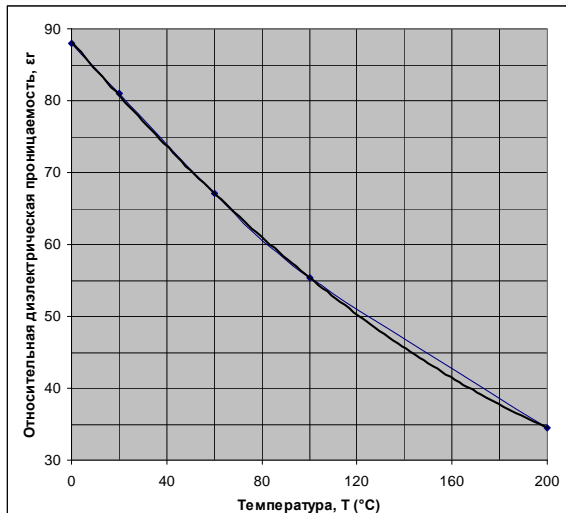


Рис. 3. График зависимости относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r воды от температуры T

Получено аналитическое выражение зависимости относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r воды от температуры T

$$\epsilon_r = 6 \cdot 10^{-3} T^2 - 0,3875T + 88,214,$$

достоверность аппроксимации $R^2=0,99$

Диэлектрическая проницаемость чистой воды для постоянного электрического поля равна 81 при 20 °С. В переменном электрическом поле диэлектрическая проницаемость воды снижается с ростом частоты приложенного электрического поля, достигая значения 4-5 для частот больше 10^{12} Гц.

На основе данных исследований Ю.Е. Марковского, А.А. Зори [3], на рис. 4 приведена зависимость резонансной частоты измерительной ячейки от кажущейся диэлектрической проницаемости раствора.

визимость резонансной частоты измерительной ячейки от кажущейся диэлектрической проницаемости раствора.

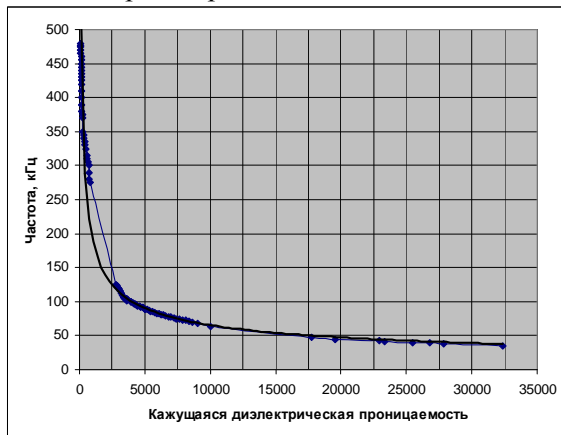


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты f измерительной ячейки от кажущейся диэлектрической проницаемости раствора ϵ^*

Получено аналитическое выражение зависимости резонансной частоты измерительной ячейки от кажущейся диэлектрической проницаемости раствора

$$f = 3984,3\epsilon^{*-0,4457},$$

достоверность аппроксимации $R^2=0,98$

В отличие от воды, большинство солей, оксидов металлов и органических веществ имеют низкую диэлектрическую проницаемость, не превышающую 10 единиц при 20 °С, поэтому

присутствие этих веществ в воде в условиях гидрорежимных наблюдательных скважин может быть достоверно обнаружено и измерено с помощью методов измерения диэлектрической проницаемости растворов.

Постановка задания. Проанализировать методы измерения общей минерализации воды, выделить факторы, которые влияют на процесс измерения, оценить применимость каждого из методов для проведения исследований в полевых условиях.

Изложение материала и результаты. Классический метод, с одной стороны, считается наиболее точным, а с другой стороны требует наличия определенного оборудования и лабораторных условий и занимает довольно продолжительное время для получения результатов. В полевых условиях использование данного метода является неэффективным с точки зрения за-

трат времени. Его использование наиболее актуально в процессе научных разработок в качестве контрольного метода.

Методы, основанные на эффекте Тиндаля, позволяют определить размеры, форму и концентрацию коллоидных частиц и макромолекул. Для измерения общей минерализации воды они малоприменимы, но могут иметь ценность как корректирующие.

Использование показателя преломления для определения уровня минерализации становится эффективным при высокой минерализации воды, от 30 г/л и выше, при низких уровнях минерализации добиться высокой точности измерения сложно, поэтому эффективность данного метода измерения минерализации невысока.

Тем не менее, в комбинации с другими методами измерения уровня минерализации этот метод позволит расширить диапазон измеряемых величин. Данный метод измерения также отличается относительной простотой и высокой скоростью получения результата. Однако коэффициент преломления также зависит и от температуры исследуемого раствора, что следует учитывать в процессе измерения.

В процессе эксплуатации кондуктометров с погружными электродами возникает явление поляризации электродов ионами солей металлов, содержащихся в воде, поэтому возникает необходимость очищать электроды в процессе эксплуатации. Использование переменного тока позволяет снизить явление поляризации.

Кондуктометрические методы отличаются относительной простотой реализации в готовых технических решениях и предоставляют возможность быстрого получения результатов измерений, что является важным фактором для проведения автоматизированных исследований гидро-режимных скважин в полевых условиях. Однако недостатки данных методов следует обязательно учитывать и искать пути их устранения, чтобы повысить эксплуатационные характеристики измерительных устройств. Также с помощью этих методов можно определить только общую минерализацию воды.

Применение методов измерения диэлектрической проницаемости усложнено тем, что диэлектрическая проницаемость значительно зависит от температуры и этот фактор обязательно надо учитывать, но с учетом условий гидро-режимных наблюдательных скважин, где колебания температуры относительно невелики, применение этих методов оправдано. Кроме того, как следует из научных источников, адаптация и усовершенствование этих методов позволит измерять не только уровень общей минерализации воды, но и измерять содержание отдельных минеральных компонент.

Следует отметить, что конструкционно-техническая реализация данных методов позволит получить определенные преимущества, поскольку электрический контакт с водой и явление поляризации электродов отсутствует.

Выводы и направление дальнейших исследований. Анализ методов измерения общей минерализации воды на современном этапе развития науки и технологий показал следующее:

каждый из методов обладает как достоинствами, так и недостатками, и их следует усовершенствовать;

ни один из рассмотренных методов в отдельности не обеспечивает точность измерений и простоту применения в полевых условиях;

для обеспечения необходимой точности в полевых условиях необходимо использовать комбинированные методы измерения минерализации воды.

Список литературы

1. Гідрохімічний довідник / В. І. Осадчий, Б. Й. Набиванець, Н. М. Осадча та ін. — К.: Ніка-Центр, 2008. — 655 с.
2. Диэлектрическая проницаемость [Электронный ресурс] / Википедия. Свободная энциклопедия. — 2016. — Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Диэлектрическая_проницаемость
3. Ю. Е. Марковский. Учет и компенсация влияния внешних дестабилизирующих факторов на радиочастотные характеристики питьевой воды / Марковский Ю. Е., Зори А.А. // Наукові праці ДонНТУ. Випуск 130. — 2008. — С. 188-194.
4. Разработка геофизического средства оперативного контроля гидро-режимных скважин: отчет по НИР № госрегистрации 0100U003835 / Криворожский технический университет; науч. рук. Азарян А. А.; рук. Цыбулевский Ю. Е. исполн.: Дрига В. В. [и др.]. — Кривой Рог, 2000. — 121 с
5. С. В. Богословский. Физические свойства газов и жидкостей: Учебное пособие / С. В. Богословский. / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. СПб., — 2001. — 73 с.: ил.

6. С. В. Сильвестров. Метрологическое обеспечение гидроакустических измерений. / С. В. Сильвестров, А. Д. Толстоухов, А. М. Трохан. // Измерительная техника – 2005 – № 1. – С. 27-30
7. Б. А. Лопатин. Теоретические основы электрохимических методов анализа. / Б. А. Лопатин. / М.: Высшая школа, – 1975. – 296 с
8. Л. Н. Латышев, В. В. Иванов. Бесконтактный кондуктометр для контроля проводимости скважинной жидкости. / Л. Н. Латышев, В. В. Иванов. // ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2013. № 2. – стр 1-10.:ил
9. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений : теория и расчет электроизмерительных мостовых схем / К. Б. Карандеев. / К.: Государственное издательство технической литературы. – 1953. – 247 с.: черт
10. В. К. Ткач. Резонаторный метод измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь жидких диэлектриков. / Ткач В.К., Степин Л.Д., Казанский В.В. // Радиотехника и электроника, 1960, Т.5, № 12 – С. 2009-2014
11. Marco Bittelli. Measuring Soil Water Content: A Review / Marco Bittelli // HortTechnology. – 2011. – №21(3). – P. 293-298
12. Marco Bittelli. Correction of TDR-based soil water content measurements in conductive soils / Marco Bittelli, Fiorenzo Salvatorelli, Paola Rossi Pisa // Geoderma. – 2007. – #143. – P. 133-142
13. Total dissolved solids [Электронный ресурс] / Wikipedia, the free encyclopedia. – 2016.– Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Total_dissolved_solids
14. Electrical conductivity meter [Электронный ресурс] / Wikipedia, the free encyclopedia. – 2016.– Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_conductivity_meter
15. A.I. Johnson. Methods of Measuring Soil Moisture in the Field:[report] / Johnson A.I. – Washington:UNITED STATES GOWERNMENT PRINTING OFFICE, 1962. – 29 p.
16. Field estimation of soil water content: a practical guide to methods, instrumentation and sensor technology / [Laurent J.P., Cepuder P., Heng, L.K. and others] ; in coord. of Evett S. – Vienna:International atomic energy agency, 2008. – 141 p.

Рукопись поступила в редакцию 31.03.16

УДК 004.942: 697.983

М.В. АНДРЕЙЧИКОВ, аспирант, Криворожский национальный университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ГАЗОВ В ЦИКЛОННОМ КОЛЛЕКТОРЕ

Циклонный коллектор - это принципиально новое устройство, который представляет собой несколько циклонов, соединенных между собой специальным образом. Невозможно представить себе современную науку без широкого применения математического моделирования. Сущность этой методологии состоит в замене исходного объекта его «образом» - математической моделью. Все естественные и общественные науки, использующие математический аппарат, по сути - занимаются математическим моделированием: заменяют объект исследования его математической моделью, и затем изучают последнюю. Связь математической модели с реальностью осуществляется с помощью цепочки гипотез, идеализаций и упрощений. С помощью математических методов описывается, как правило, идеальный объект, построенный на этапе содержательного моделирования. Эта область науки зародилась несколько веков назад. Но стала приобретать современные черты, и развиваться особенно интенсивно с началом компьютерной революции - во II половине XX века. «Этот «третий метод» познания, конструирования, проектирования, сочетает в себе многие достоинства как теории, так и эксперимента. Работа не с самим объектом (явлением, процессом), а с его моделью дает возможность безболезненно, относительно быстро и без существенных затрат исследовать его свойства и поведение в любых мыслимых ситуациях (преимущества теории). В то же время вычислительные (компьютерные, симуляционные, имитационные) эксперименты с моделями объектов позволяют, опираясь на мощь современных вычислительных методов и технических инструментов информатики, подробно и глубоко изучать объекты в достаточной полноте, недоступной чисто теоретическим подходам (преимущества эксперимента). Неудивительно, что методология математического моделирования бурно развивается, охватывая все новые сферы - от разработки технических систем и управления ими до анализа сложнейших экономических и социальных процессов» - из монографии основоположника научного направления в Советском Союзе академика А.А. Самарского.

Ключевые слова: циклонный коллектор, математическая модель, аналитический путь

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Математическую модель можно считать построенной, когда идеальный объект изучаемого явления выбран, и математически описан, т.е. известна система уравнений и неравенств, которым подчиняются параметры модели. Теперь остается исследовать построенную модель. Можно это сделать двумя путями. Во-первых, аналитически, на основе разработанных в прикладной математике методов, - если модель достаточно проста и поддается такому подходу. Аналитический путь обладает существенными преимуществами - он прозрачен и нагляден. Позволяет выявить зависимости между параметрами, и сделать рекомендации по улучшению самой модели или изучаемого техниче-