

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИКЛОНОВ И СКРУББЕРОВ**

В.С. Асламова, А.А. Жабей

Ангарская государственная техническая академия

E-mail: veras@pisem.net

Представлена структура и функциональные возможности автоматизированной системы исследований циклонов и скрубберов, предназначенной для определения плотности пыли и ее гранулометрического состава методом жидкостной седиментации в гравитационном поле, статистической обработки результатов экспериментального исследования процесса сепарации в прямоточном циклоне с промежуточным отбором пыли, расчета эффективности пылеулавливания и гидравлического сопротивления циклонов и скрубберов по известным и авторским методам, выбора оптимального пылеуловителя на заданные режимы его эксплуатации.

**Ключевые слова:**

Автоматизированная система научных исследований, базы данных, циклон, скруббер, седиментация, эффективность пылеулавливания, гидравлическое сопротивление.

**Key words:**

The automated research system, data base, cyclone, volume, sedimentation, dust collection efficiency, flow resistance.

Разработка высокоэффективного пылеулавливающего оборудования является задачей высокого приоритета, поскольку используемые на предприятиях пылеочистные установки не всегда удовлетворяют нормам ПДК, а к качеству очистки газов от пыли предъявляются все более жесткие требования. При проектировании пылеулавливающих устройств необходимо исходить из условия максимальной степени очистки при минимальных энергетических затратах. При этом чрезвычайно важно точно рассчитать ожидаемые показатели работы пылеуловителя и спрогнозировать его эффективность пылеулавливания для заданных режимов эксплуатации. Однако в настоящее время отсутствует программное обеспечение для прогнозирования показателей работы пылеуловителей. Кроме того, при испытании опытных образцов пылеуловителя необходимо обрабатывать множество экспериментальных данных, ручная обработка которых занимает длительное время и обладает высокой трудоемкостью. Для автоматизации перечисленных операций была разработана автоматизированная система научных исследований пылеуловителей (АСНИ) «Пылеочистка», выполненная в двух модификациях — клиент/серверной (на базе MS SQL Server) и локальной (MS Access) архитектуре.

Структура автоматизированной системы «Пылеочистка» представлена на рис. 1. АСНИ представляет собой совокупность базы данных «Циклоны» и трех основных программных подсистем, выполняющих задачи технологического расчета циклонов (АПТРЦ) и скрубберов (АПТРС), обработки результатов исследования процесса сепарации в ПЦПО.

Подсистема обработки результатов исследования процесса сепарации включает программные модули анализа гранулометрического состава пыли, плотности пыли, экспериментальных данных процесса сепарации.

АСНИ реализует следующие функции:

- хранение в базе данных (БД) технологических характеристик пылеуловителей (циклонов и скрубберов), а также физико-химических свойств жидкостей, газов и пылей, справочной информации;
- определение характеристик пыли (масс-медианного диаметра частиц и логарифмов среднеквадратического отклонения диаметров частиц, плотности пыли) и запись полученных значений в базу данных;
- расчет показателей работы прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли (ПЦПО) и статистическая обработка результатов исследования процесса сепарации в прямоточном циклоне;
- расчет гидравлического сопротивления и эффективности пылеулавливания циклонов и скрубберов по различным общеизвестным и авторским методикам, выбранным пользователем;
- автоматизированный подбор пылеуловителя на заданные режимы эксплуатации по критерию максимальной эффективности пылеулавливания;
- формирование отчетности в программном модуле MS Excel.

Взаимодействие клиентского приложения с базой данных осуществляется при помощи модуля управления данными БД.

Программный модуль «Седиментация» разработан для упрощения и ускорения расчетов в процессе определения гранулометрического состава пылей методом жидкостной седиментации в гравитационном поле. Диалоговое окно для расчета диаметров частиц и кривая седиментации, полученная в результате обработки данных, приведены на рис. 2.

Графическая и аналитическая обработка результатов и определение в пробе процентного со-

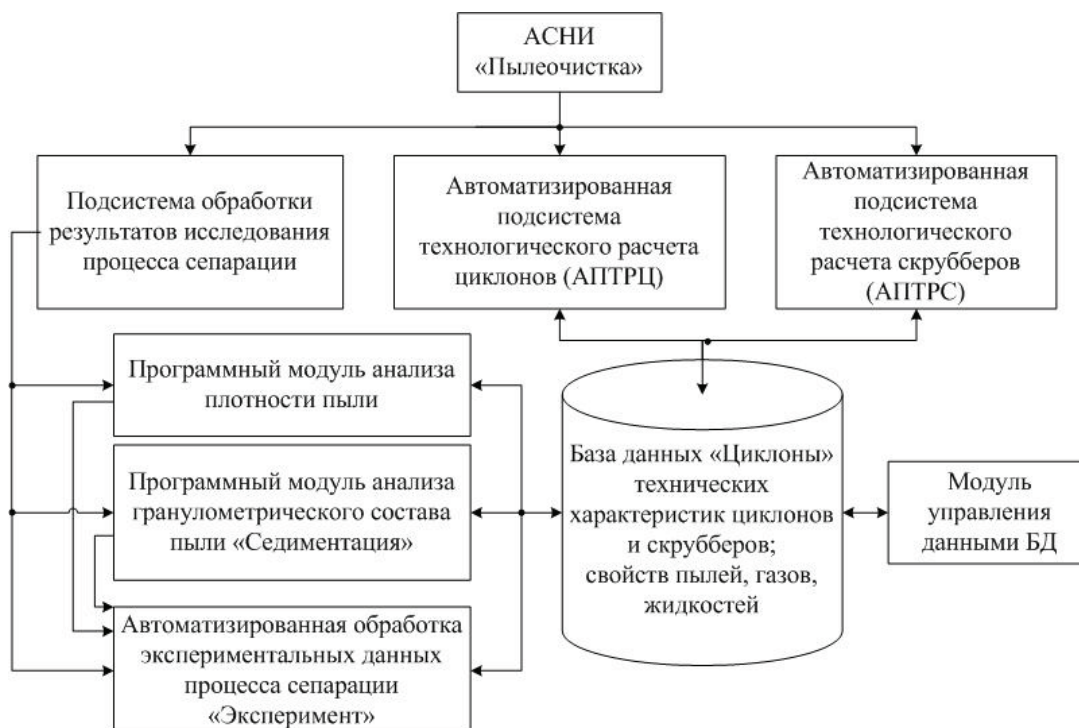


Рис. 1. Структура АСНИ

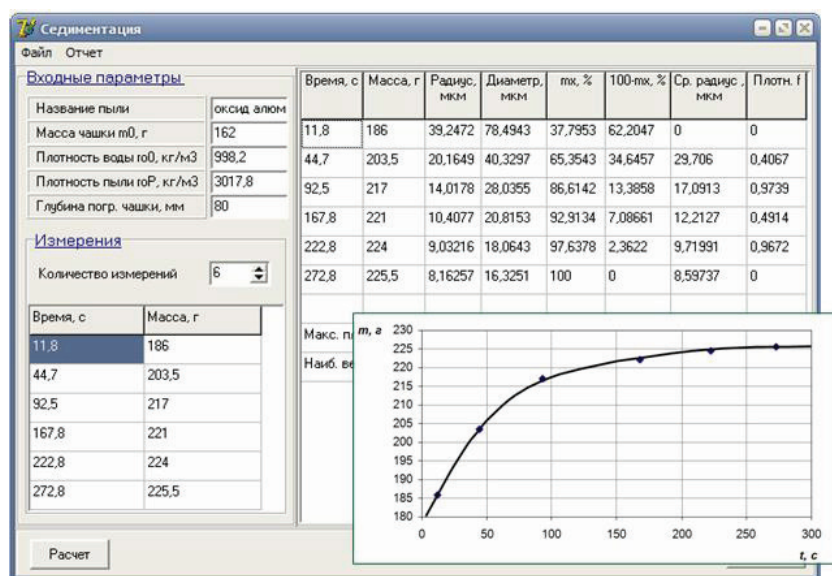


Рис. 2. Диалоговое окно программного модуля «Седиментация»

держания фракций различной дисперсности проводится по методикам, принятым в седиментационном анализе. Для уточнения размеров крупных частиц коэффициент гидравлического сопротивления частицы определялся не по формуле Стокса, а по формуле Сиска, поскольку формула Стокса справедлива для критерия Рейнольдса  $Re_\delta = \rho_w w_s \delta / \mu_k \leq 0,1$  ( $\mu_k$ ,  $\rho_w$ ,  $w_s$ ,  $\delta$  – динамическая вязкость и плотность жидкости, скорость седиментации частицы диаметром  $\delta$ ). Регрессионное уравнение Сиска справедливо с точностью 2 % в широком интервале изменения критерия  $Re_\delta$ :  $0,1 < Re_\delta < 3500$ .

Для автоматизации обработки экспериментальных данных была разработана подсистема «Эксперимент», позволяющая существенно упростить и ускорить обработку и анализ информации. Программный модуль «Эксперимент» предназначен для получения расчетных значений опытных данных по известным зависимостям. В качестве исходных значений используются введенные пользователем экспериментальные данные и предопределенные константы. Выходная информация представляется в виде текстовых файлов и файлов в формате MS Excel со статистически обработанными

ми результатами. Для создания отчетов используются шаблоны MS Excel, содержащие предварительное форматирование и связывание данных. При этом создаются таблицы с входными и выходными данными, производится подсчет параметров регрессионных зависимостей и создание графиков на основе полученных значений. Предусмотрено несколько способов расчета: для одного опыта, для серии опытов с вводом данных вручную или с использованием входного текстового файла.

АПТРЦ обеспечивает прогнозирование показателей работы циклонов на основе различных методов (стандартная методика НИИОГАЗ; метод расчета эффективности пылеулавливания на основе инструментальных замеров; фракционный метод М.И. Шилиева [1]; эмпирические методы расчета показателей работы циклонов любого типа [2] и только прямооточных, разработанные авторами [3]), выбор которых предоставляется пользователю. В АПТРЦ реализованы встроенные средства для принятия оптимального решения о виде проектируемого циклона для заданных режимов работы. В системе предусмотрена защита от некорректного ввода данных. Автоматизированная подсистема технологического расчета циклонных пылеуловителей зарегистрирована в отраслевом фонде алгоритмов и программ (№ 8990) [4], номер государственной регистрации в «Национальном информационном фонде неопубликованных документов»: 50200701900 от 6.09.2007.

Нами предложен способ определения эффективности пылеулавливания циклона любого типа (прямоточного, противоточного, вихревого) [5] по известной эффективности пылеулавливания эталонного циклона  $\eta_a$ , геометрически подобного данному, при масштабном переходе с режима (индекс  $a$ ) на заданный режим работы с параметрами  $D$ ,  $\delta$ ,  $z$ ,  $\rho$  и с использованием коэффициентов уноса, учитывающих  $K_d$  – диаметр циклона (1),  $K_\delta$  – медианный диаметр частиц пыли (2),  $K_z$  – запыленность входного потока (3),  $K_\rho$  – плотность пыли (4), при этом неизвестная эффективность очистки  $\eta_p$  вычисляется по формуле (5).

$$K_d = 6,945 \cdot D^{0,865};$$

$$(F=148,0 > F_T=5,12; D=0,1...0,6, \text{ м}); \quad (1)$$

$$K_\delta = \exp(0,424 - 0,052 \cdot \delta_m);$$

$$(F=134,3 > F_T=4,35; \delta_m=9,5...50, \text{ мкм}); \quad (2)$$

$$K_z = 0,938 + 67,71(z - 0,12)^2;$$

$$(F=67,07 > F_T=3,40; z=0,035...0,22, \text{ кг/м}^3); \quad (3)$$

$$K_\rho = 1,454 - 0,00034 \cdot \rho;$$

$$(F=27,62 > F_T=10,1; \rho=1380...3032, \text{ кг/м}^3), \quad (4)$$

где  $F$ ,  $F_T$  – наблюдаемый и табличный для уровня значимости 0,05 критерии Фишера–Снедекора.

$$\eta_p = 1 - (K_D K_\delta K_z K_\rho)(1 - \eta_a) / (K_{D_a} K_{\delta_a} K_{z_a} K_{\rho_a}). \quad (5)$$

Сопоставление экспериментальной эффективности очистки  $\eta_p$  циклонов с расчетной  $\eta_p$  по формуле (8) приведено на рис. 3. Для сравнения на

рис. 4 приведено сопоставление  $\eta_p$  с расчетной эффективностью  $\eta_p$ , полученной в АПТРЦ по методике НИИОГАЗ для противоточных и прямооточных циклонов (объем выборки – 20 циклонов; коэффициент корреляции 0,386, критерий Фишера–Снедекора 3,14 ( $< F_T=4,41$ ), критерий Дарбина–Уотсона 1,81). Анализ показывает, что расчет по предлагаемой методике является более точным по сравнению с методикой НИИОГАЗ в указанных пределах применимости.

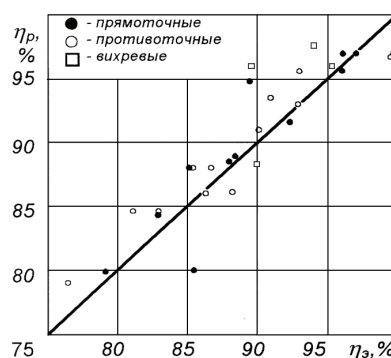


Рис. 3. Сопоставление экспериментальной и расчетной, ур. (1)–(5), эффективности очистки

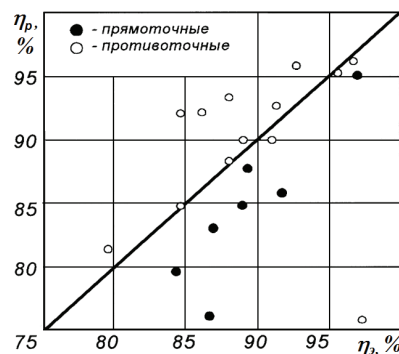


Рис. 4. Сопоставление экспериментальной и расчетной (методика НИИОГАЗ) эффективности очистки

Блок-схема алгоритма расчета эффективности очистки циклонов любого типа по универсальному методу представлена на рис. 5.

АПТРС предназначена для расчета скрубберов с помощью двух методов: энергетического и фракционного. При расчете с помощью энергетического метода вычисляется два параметра – затраты энергии на осуществление мокрой очистки газов от пыли и эффективность очистки [1, 6]. Входными параметрами являются гидравлическое сопротивление аппарата, расход жидкости и газа, напор жидкости и свойства пылей.

Затраты энергии на осуществление мокрой очистки газов от пыли – величина энергии соприкосновения  $K_u$  (в кДж/1000 м<sup>3</sup> газов) определяется из уравнения:

$$K_u = \Delta p_{an} + p_{ж} Q_{ж} / Q_{г},$$

где  $\Delta p_{an}$  – гидравлическое сопротивление аппарата;  $p_{ж}$  – напор распыляемой жидкости, Па;  $Q_{ж}$ ,  $Q_{г}$  –

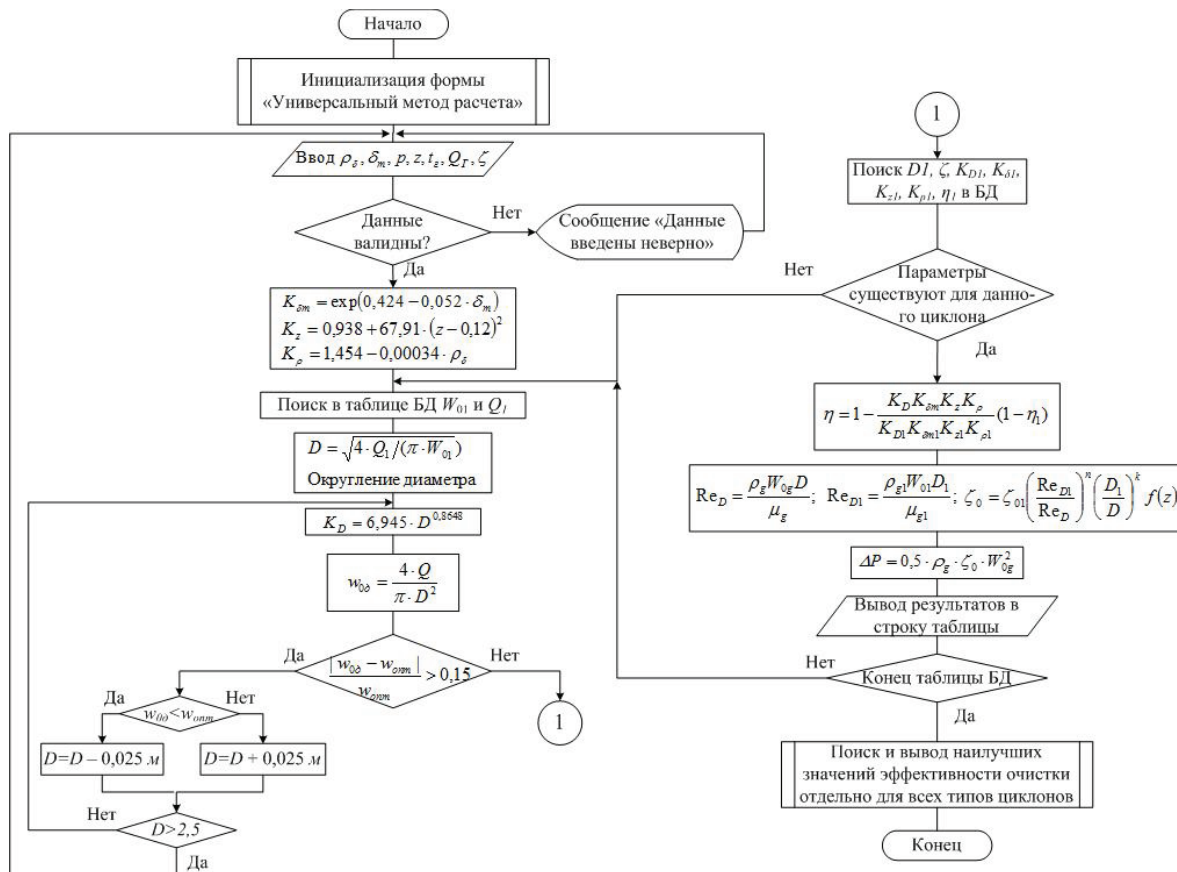


Рис. 5. Блок-схема метода оценки эффективности очистки циклонов любого типа

объемные расходы соответственно жидкости и газа.

Зависимость между степенью очистки газов и затратами энергии для мокрых пылеуловителей аппроксимируется уравнением  $\eta_{\Sigma} = 1 - \exp(-\psi K_{\chi}^{\chi})$ , где инерционный параметр  $\psi$  и  $\chi$  – константы, зависящие только от свойств пыли и газа, определяемые экспериментальным путем. Физические и химические свойства газов и пылей, необходимые при выполнении расчетов, автоматически выбираются из таблиц базы данных «Циклоны».

Так как величина  $\eta_{\Sigma}$  неточно характеризует качество очистки в интервале высоких степеней очистки, превышающих 98 %, то часто используют параметр  $N_{\chi}$  – число единиц переноса. Соотношение числа единиц переноса с величиной эффективности пылеулавливания также определяется по таблицам базы данных.

Второй метод, используемый в АПТРС – метод расчета фракционной эффективности пылеулавливания  $\eta_{\delta}$  в скруббере Вентури, который учитывает влияние коэффициента орошения  $q$ , фракционного коэффициента проскока  $K_{\delta}$  и коэффициента  $K$ , характеризующего эффективную длину горловины трубы Вентури [1], которые принимаются в качестве исходных данных для расчета:

$$\eta_{\delta} = 1 - K_{\delta} = 1 - \exp(-Kq\sqrt{Stk}).$$

На рис. 6 представлена блок-схема алгоритма расчета скрубберов с помощью энергетического и фракционного методов.

На рис. 7 показан иллюстративный алгоритм расчета фракционной эффективности скрубберов Вентури. Рассчитывается скруббер Вентури с длиной горловины 200 мм, диаметром 30 мм и коэффициентом орошения 5,9 л/м<sup>3</sup>. Очистка производится водой при 60 °С. Время динамической релаксации частиц составляет 8 мс. Ввод параметров и просмотр выходных данных осуществляется на вкладке «Фракционный метод» диалогового окна модуля. Исходными данными для выполнения расчета являются коэффициент, зависящий от эффективной длины горловины аппарата, коэффициент орошения и число Стокса. Если неизвестен первый коэффициент, можно ввести данные о диаметре и длине горловины трубы Вентури, либо эффективную длину горловины. Для расчета числа Стокса необходимо нажать кнопку , при этом отобразится окно для ввода данных вручную, либо, при отсутствии каких-либо данных, выбора данных из БД по известному типу пыли, газа или жидкости. В данном случае для вычисления размера капель выбирается в БД вода при 60 °С, данные автоматически записываются в нужные текстовые поля.

Достоинствами разработанной АСНИ являются простота использования, удобный пользо-



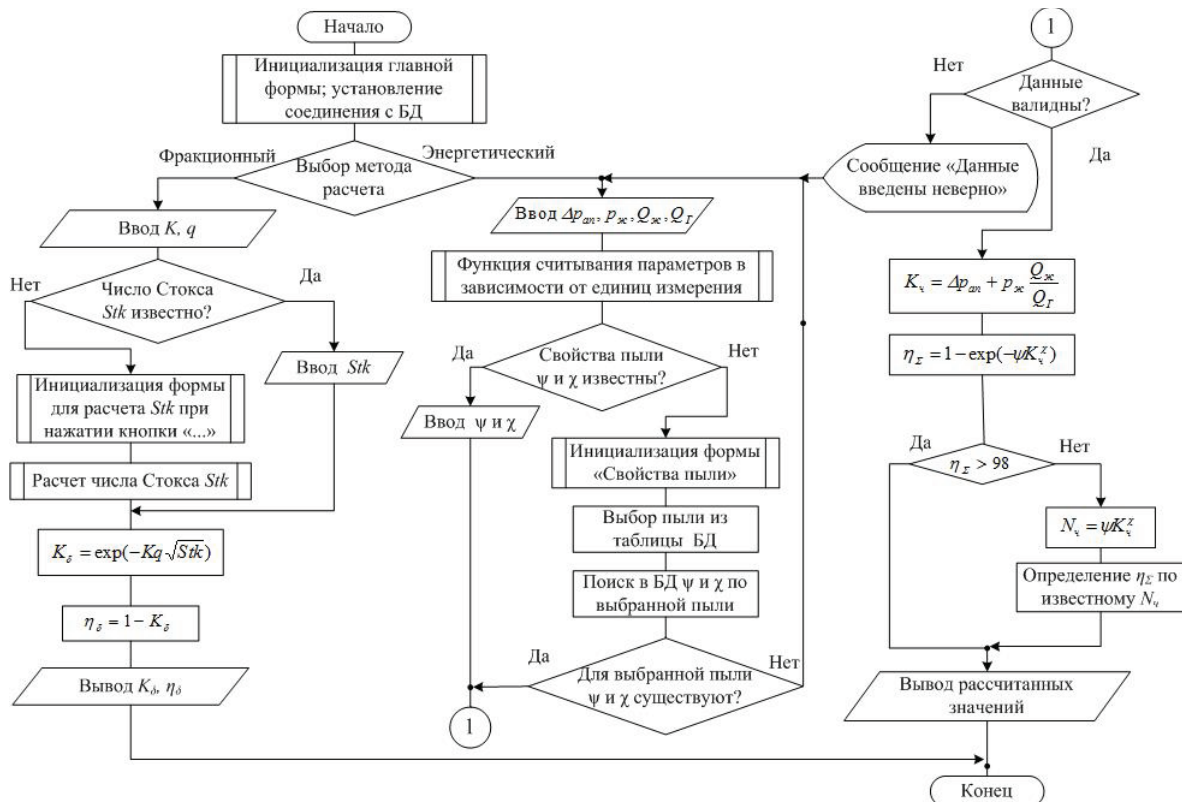


Рис. 6. Блок-схема фракционного и энергетического методов расчета

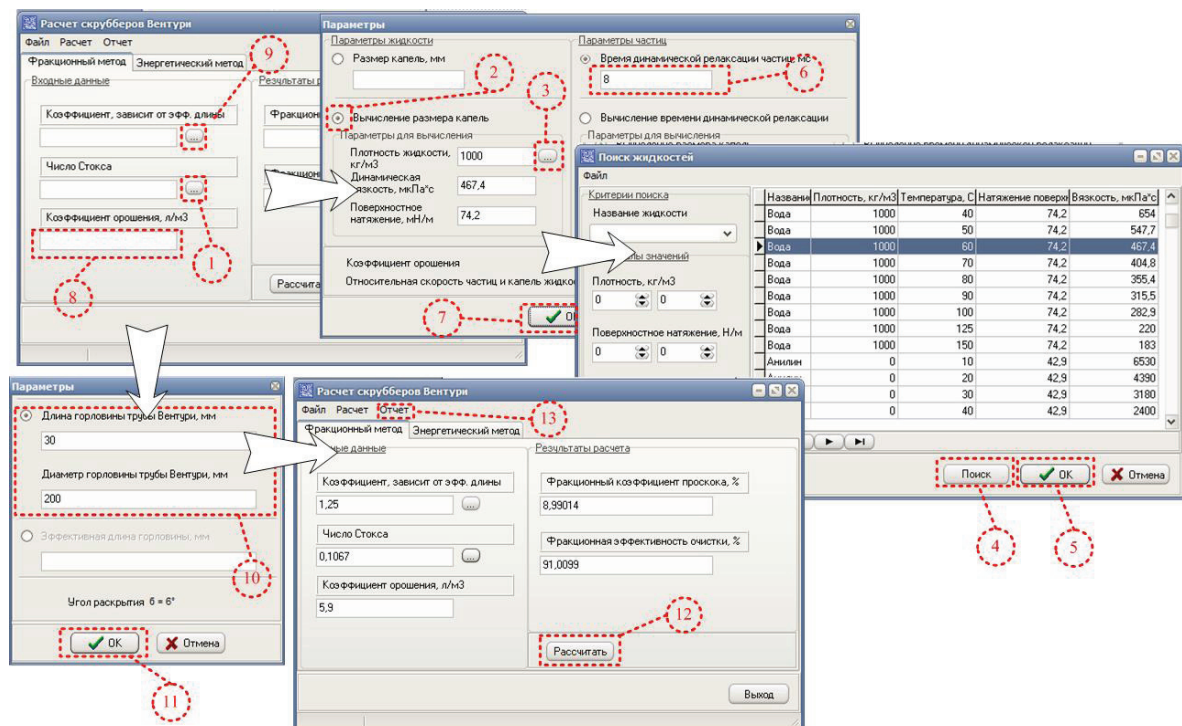


Рис. 7. Иллюстративный алгоритм расчета скрубберов

вательский интерфейс, легкость в освоении и возможность оценки качества очистки проектируемых циклонов и скрубберов при заданном режиме работы. АПТРС позволяет определить оп-

тимальные значения технологических параметров, например, расхода орошения, максимизирующего эффективность очистки скруббера Вентури.

Подсистемы АПТРЦ и АПТРС апробированы и внедрены в учебные процессы Ангарской государственной технической академии, Иркутского государственного университета путей сообщения, Томского политехнического университета и Восточно-Сибирского технологического университета (г. Улан-Удэ).

Разработанную АСНИ можно использовать для создания компьютеризированных лабораторных практикумов, проведения седиментационного анализа и исследования процесса сепарации. АСНИ позволяет снизить трудоемкость обработки данных и сократить сроки исследования. АПТРЦ и АПТРС также могут быть использованы в качестве подсистем САПР химико-технологического и природоохранного оборудования.

### Выводы

1. Показано что, декомпозиционный подход к систематизации экспериментальных данных

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиляев М.И., Шиляев А.М., Грищенко Е.П. Методы расчета пылеуловителей. -Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2006. – 385 с.
2. Асламова В.С., Асламов А.А., Мусева Т.Н., Жабей А.А. Универсальный метод расчета эффективности пылеулавливания циклонов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 1. – С. 34–37.
3. Асламова В.С., Асламов А.А., Брагин Н.А., Мусева Т.Н., Жабей А.А., Гредюшко А.Н. Статистическое моделирование эффективности пылеулавливания прямоточных пылеуловителей при масштабном переходе // Химическая промышленность сегодня. – 2008. – № 2. – С. 42–48.
4. Обеспечивает достоверность и точность предлагаемых регрессионных моделей прогнозирования эффективности очистки при масштабном переходе к другому типоразмеру и смене режимов работы: для циклонов любых типов (ошибка прогноза  $\pm 2...4\%$ ) и только для прямоточных циклонов с учетом среднерасходной скорости потока (ошибка прогноза  $\pm 1,6\%$ ).
5. Исследовано что, использование формулы Сис-ка для определения коэффициента гидравлического сопротивления крупных частицы размером более 40 мкм позволило определить гранулометрический состав пыли с точностью  $\approx 2\%$ .
6. Исследовано что, повышение напора и расхода жидкости незначительно влияют на эффективность сепарации скрубберов (1...2 %). Увеличение гидравлического сопротивления аппарата в 3 раза вызывает значительное повышение эффективности пылеулавливания.
7. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 8990. Автоматизированная система расчета эффективности циклонных пылеуловителей / А.А. Жабей, В.С. Асламова, А.А. Асламов. Заявлено 16.05.2007. Опубл. 27.08.07.
8. Пат. 2358810 РФ. МПК<sup>8</sup> В04С 3/00, В04С 5/00. Способ определения эффективности пылеулавливания циклонов / В.С. Асламова, А.А. Асламов, А.А. Жабей. Заявлено 10.05.07; Опубл. 20.06.09, Бюл. № 17. – 2 с.
9. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под ред. А.А. Русанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.

Поступила 19.10.2009 г.