

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

За пятнадцать лет, прошедших с момента выхода первого издания, книга не потеряла своей полезности, что подтверждается устойчивостью ее статуса в сети Интернет. Вместе с тем третье тысячелетие уже внесло в практику проектно-конструкторской работы ряд перемен. Из них особенно заметны те, что оказались непосредственно связаны с развитием вычислительной техники. Теперь уже не один изготовитель газоочистного оборудования, отечественный и зарубежный, считает своим долгом упомянуть, что его аппараты обсчитывались методами вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics — CFD). Следовательно, пользователь оборудования также должен иметь познания в данной области — хотя бы для того, чтобы суметь понять, какова была в том надобность и в чем прогресс. Поэтому мы сочли долгом дать отдельной главой краткое пользовательское введение с самым общим показом проблем и перспектив аппликации CFD к конкретным процессам и аппаратам пылеосаждения, золоулавливания и газоочистки. Этот, конечно, только начальный этап знакомства с CFD сравним с первым шагом путешествия в страну новых возможностей. Вместе с тем представляемого в книге информационного багажа достаточно, чтобы достичь их, продолжая совершенствоваться уже самостоятельно в интересующем пользователя конкретном направлении.

Все прежние разделы также переработаны с позиции максимального приближения работы проектировщика к вычислительной технике и сети Интернет. Вместе с тем, на наш взгляд, было бы крайне нецелесообразно оставлять вместо примеров расчетов аппаратов только алгоритмы. Чтобы при этом объем книги чрезмерно не возрос, пришлось ограничиться в объемах представления информации, имеющей сколько-нибудь ретроградный характер и которую несложно получить в сети Интернет. В первую очередь это коснулось переводных таблиц единиц

измерения физических величин и ряда чертежей по каталогам предприятий химического машиностроения. Также пришлось выделить в отдельное производство морально устаревшую главу 3 (пожалуй, сейчас проектировщики вряд ли могут даже представить, что когда-то рассеивание примесей в атмосфере рассчитывалось вручную), готовящуюся как самостоятельное издание. В главе 3 данного издания книги теперь помещены прикладные вопросы вычислительной гидродинамики.

Общее редактирование издания и переработка глав 1, 2, 4 выполнены М. Г. Зиганшиным, главы 3, 5 переработаны А. М. Зиганшиным, глава 6 — А. А. Колесником. Материал книги претерпел заметные изменения, и авторы с благодарностью воспримут все предложения, направленные на дальнейшее улучшение издания. Авторы высоко оценивают работу рецензентов и особо благодарны им за все замечания и полезные советы.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Стабильность роста загрязнения окружающей среды позволяет, вероятно, называть это явление наиболее характерной чертой завершающегося столетия. В докладе Международной комиссии по окружающей среде и развитию («Комиссии Брундтланд»), работавшей в 1984–1987 гг., отмечается, что несогласованность действий человека с законами природы привела к изменениям существующих на планете структур и опасности уничтожения жизни на Земле [1].

За прошедшее десятилетие серьезных практических шагов, которые позволили бы заметно изменить отношение человеческого сообщества к природе, к проблеме ее сохранения для обеспечения устойчивого развития будущих поколений, не сделано. Банк нерешенных экологических задач продолжал увеличиваться. Причин тому много, и среди них не последнее место занимает слабый профессионализм людей, принимающих решения в области охраны окружающей среды, и в частности в сфере ее защиты от отходов производственной деятельности.

Сказанное в полной мере касается и проблемы защиты атмосферного воздуха от пылегазовых выбросов. Трудно не догадаться, что все выброшенное в атмосферу должно в скором времени возвратиться к нам обратно. Западные специалисты-экологи, столкнувшись еще несколько десятилетий назад с удручающими последствиями загрязнения биосферы, называли природные структуры планеты «закольцованной рекой» («Round River» [2]) или, категоричнее, «закрывающимся циклом» («The Closing Circle» [3]). В последние годы волна атмосферного загрязнения накрывает и нас.

Предлагаемая читателям книга посвящена анализу санитарно-технических мер защиты атмосферного воздуха и устройств, применяемых в настоящее время для обезвреживания пылегазовых выбросов. Рассматривая арсенал имеющихся в распоряжении средств очистки, методов их расчета и конс-

труирования, приходится констатировать отсутствие существенного прогресса в этом направлении. И если среди пылеосадителей еще можно выделить несколько типов достаточно эффективных устройств, то средств обработки токсичных газов, позволяющих снижать концентрации вредных до величин, сопоставимых с предельно допустимыми (ПДК), нет. Недостаточно корректно определены и сами понятия ПДК. Методики расчетов аппаратов пылегазоочистки дают лишь ориентировочные результаты; отсутствует надежная справочная информация о свойствах большинства загрязнителей, а изданные когда-то фундаментальные справочники по сопряженным областям расчета (термодинамике, теплопередаче, гидравлике, например [4–6]) давно стали библиографической редкостью. Не всегда корректны даже правила подсчета степени очистки выбросов. Поэтому не меньшую роль, чем конструирование и расчеты аппаратов систем пылегазоочистки, продолжают играть их пусковая и эксплуатационная наладка.

Процессы, происходящие в очистных устройствах, как правило, сложнее технологических процессов, порождающих очищаемые выбросы. Несмотря на это, сфере пылегазоочистки уделяется лишь эпизодическое внимание, а средства на развитие отводятся по остаточному принципу. Теперь уже не приходится сомневаться, что нам удастся проскочить в третье тысячелетие в «грязной обуви» и с арсеналом экологических проблем вместо средств очистки. Однако отложить проблемы в долгий ящик вряд ли будет возможно: значительная часть «экологического капитала» планеты уже израсходована [1].

Очевидно, в ближайшем будущем станут необходимы новые, значительно более эффективные решения по очистке выбросов, вновь появится потребность в профессионально подготовленных специалистах, способных принимать верные решения при проектировании, монтаже и эксплуатации пылегазоочистных систем и в целом в области охраны окружающей среды. В предлагаемом издании приведены в сжатой форме общие сведения о физико-химических процессах, необходимые при конструировании, расчетах и эксплуатации очистных аппаратов, имеется довольно широкая информация о составе и свойствах производственных выбросов и загрязнителей, рассмотрены методы и приведены примеры расчетов широко используемых пылеосадителей и газоочистных устройств, методы пусковой наладки ряда аппаратов. Главы 1, 2, 4, 5 написаны М. Г. Зиганшиным, глава 3 — В. Н. Посохиным, глава 6 — А. А. Колесником. Общее редактирование выполнено В. Н. Посохиным.

Авторы выражают надежду, что книга будет полезна студентам высших технических учебных заведений, а также ИТР, работающим в области охраны атмосферы от загрязнения производственными пылегазовыми выбросами. Авторы благодарят рецензентов за ценные замечания и будут признательны за все предложения, направленные на улучшение издания.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

СИМВОЛЫ

- A — работа, Дж
 b — расстояние, ширина, м
 C — концентрация газообразного загрязнителя в воздухе, мг/м³ (в экономических расчетах — эксплуатационные расходы)
 c — теплоемкость, Дж/(кг·°C)
 D — диаметр, м; коэффициент диффузии, м²/с
 d — дифференциал; влагосодержание газа, г/(кг газа)
 E — напряженность электрического поля, В/м (в экономических расчетах — эффективность затрат)
 F — свободная энергия, Дж
 f — площадь, м²
 G — свободная энтальпия, Дж; расход газовой фазы, м³/с
 g — массовая доля; ускорение свободного падения, м/с²
 h — высота, м
 I — энтальпия, Дж
 j — поток массы, кг/с
 K — кинетическая энергия, Дж; коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C), или массопередачи, кг/(м²·с) (в экономических расчетах — капиталовложения)
 k — константа скорости реакции, другие константы и коэффициенты
 L — расход жидкой фазы, кг/с; пределы воспламенения горючих смесей, %
 l — расстояние, длина, м
 m — масса, кг
 M — число единиц, компонентов, объектов; число Маха
 N — количество вещества, молей, ингредиентов, частей, объектов
 n — мольная доля
 p — давление, Па
 Q — количество теплоты, теплота сгорания, Дж/м³

q — тепловой поток, Дж (q_3 — потери тепла от химического недожога)
 R — газовая постоянная, Дж/(кг·К); электрическое сопротивление, Ом
 r — объемная доля, радиус
 Re — критерий Рейнольдса
 S — энтропия, Дж; сила, Н
 Stk — критерий Стокса
 T — абсолютная температура, К
 t — температура, °С
 U — внутренняя энергия, Дж
 V — объем, м³
 v — удельный объем, м³/кг
 W — расход, м³/с
 w — скорость, м/с
 x — доля компонента в жидкой фазе
 y — доля компонента в газовой (паровой фазе)
 z — концентрация золы или пыли в газовой фазе, мг/м³; коэффициент сжимаемости; коэффициент аффинности
 A — коэффициент избытка воздуха, самосогласованная величина
 α — коэффициент избытка воздуха по топливу; коэффициент теплоотдачи Вт/(м²·°С), степень диссоциации вещества в химической реакции, коэффициент разветвления цепей
 β — вспомогательный коэффициент избытка воздуха; коэффициент массоотдачи, коэффициент диссоциации, коэффициент обрыва цепей
 γ — вспомогательный коэффициент избытка воздуха
 δ — расстояние, шаг, м
 ε — коэффициент проскока; порозность слоя; газонасыщение слоя ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная вакуума)
 ζ — коэффициент местного сопротивления
 η — динамический коэффициент вязкости, Па·с; степень очистки
 ι — коэффициент использования топлива
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
 μ — молярная масса
 ν — кинематический коэффициент вязкости, м²/с
 ξ — мера реакции
 Π — произведение
 ρ — плотность, кг/м³ (ρ_s — оптическая плотность)
 Σ — сумма
 σ — дисперсия; поверхностное натяжение, Н/м
 T — безразмерный временной параметр
 τ — время, с
 φ — относительная влажность
 Ψ — коэффициент Генри, Па⁻¹
 ψ — химический потенциал, Дж/кг

ИНДЕКСЫ УСЛОВИЙ

<i>b</i>	— начальное
<i>BET</i>	— промежуточное (между начальным и конечным)
<i>cl</i>	— расчетное
<i>d</i>	— динамическое
<i>e</i>	— конечное
<i>eq</i>	— эквивалентное, равновесное
<i>h</i>	— высшее
<i>κ</i>	— условие калибровки
<i>int</i>	— промежуточное
<i>low</i>	— низшее, нижнее, меньшее
<i>lef</i>	— левое
<i>m</i>	— среднее
<i>max</i>	— максимальное
<i>min</i>	— минимальное
<i>opt</i>	— оптимальное
<i>p</i>	— частичное, парциальное
<i>r</i>	— реальное, фактическое, действительное, опытное, измеренное
<i>rig</i>	— правое
<i>rl</i>	— относительное
<i>STD</i>	— стандартное
<i>th</i>	— теоретическое
<i>tot</i>	— полное, общее
<i>u</i>	— верхнее
<i>uf</i>	— равномерное (uniform)
<i>wr</i>	— рабочее
0	— нормальное (273,15 К или 0,101325 МПа)

ИНДЕКСЫ СОСТОЯНИЙ

<i>bnd</i>	— связанное
<i>blk</i>	— насыпное
<i>cr</i>	— критическое
<i>fr</i>	— свободное
<i>G</i>	— газообразное
<i>L</i>	— жидкое
<i>S</i>	— твердое
<i>s</i>	— статическое
<i>sat</i>	— насыщенное
0	— нормальное (273,15 К и 0,101325 МПа)

ИНДЕКСЫ ПРОЦЕССОВ

<i>ab</i>	— абсорбция
<i>ad</i>	— адсорбция
<i>bl</i>	— кипение, котел, бойлер
<i>cm</i>	— горение

cn — конденсация
ds — десорбция
ev — испарение
P — изобарный
V — изохорный
T — изотермический
I — изоэнтальпный
sat — насыщение
tch — касание

ИНДЕКСЫ ОБЪЕКТОВ И СВОЙСТВ

a — отбросные газы, обрабатываемый воздух; абсолютное давление (absolute pressure)
air — атмосферный воздух
b — начальные, входные характеристики; балластные компоненты
bar — барометрическое давление
BET — промежуточные значения
bnd — связанная величина, связь
blk — насыпной
c — калориметрический
cl — расчетные величины
clr — чистый, светлый
d — динамическое давление
D — диффузионный
db — сухой термометр (dry-bulb)
DBT — температура сухого термометра
df — дрейф
dis — дисперсный, диспергированный
dk — темный
dr — капля
dry — сухой
DP — точка росы (dew point)
e — конечные, выходные характеристики
eff — эффективные величины
f — топливо, топливный газ
fg — дым, дымовые газы
fil — заполнение; насыпной
fl — унос, летучая часть
flm — пламя
fr — свободный
frt — вспененная жидкость, пена
g — массовый; избыточное (манометрическое, «приборное») давление (gauge pressure)
HHV — высшая теплота сгорания (higher heating value)
i — ингредиент, компонент
ir — орошение

l — ламинарный режим
lin — линия, линейный; длина
LNG — сжиженный углеводородный (природный) газ
LHV — низшая теплота сгорания (lower heating value)
m — средние значения величин
mx — смесь
n — мольный
NG — природный газ
ob — препятствие
p — частица
pfa — унос, летучая часть золы
PL — трубопроводная линия
pyr — пирометрический
r — опытные, измеренные, действительные величины
red — приведенные значения
s — статическое давление
sdl — графическое
sat — насыщенное
sf — поверхность
sep — сепарационный
sj — пребывание
ss — межтрубное пространство (shell side)
st — пар
t — турбулентный режим
tab — табличные данные
ts — трубное пространство (tube space)
v — объемный
w — мокрый, влажный
wb — мокрый термометр (wet-bulb)
WBT — температура мокрого термометра
wl — стенка
x — характеристики жидкой фазы (среды)
y — характеристики газовой фазы (среды)

ВВЕДЕНИЕ

Наша планета, перемещаясь во Вселенной, непрерывно обменивается с ней веществом и энергией. В сложном материально-энергетическом балансе Земли часть энергии отводится на поддержание цепи неисчерпаемых превращений и перемещений материи в пределах самой планеты. К настоящему времени следы человеческой деятельности в них стали настолько заметны, что возникла необходимость различать причины, вызывающие обмен веществ в биосфере.

Загрязнение атмосферы может происходить вследствие преобразования ее компонентов и/или переноса загрязняющих веществ из других частей биосферы. Эти процессы могут иметь природный или антропогенный характер.

Выделения, оказавшиеся в атмосфере, относят к природным, если они образовались и/или были перенесены в результате природных явлений. Каждый ингредиент природных выделений, несмотря на их бесконечное многообразие, приобрел за миллиарды лет эволюции планеты свое место и значение в замкнутых циклах природных процессов обмена веществ. Кроме редких случаев, имеющих характер катаклизмов, такие выделения не вызывают катастрофического изменения окружающих условий, процессов и установившегося естественного хода событий в природе планеты в целом.

Вещества, попадающие в атмосферу непосредственно из-за человеческой деятельности, обычно относят к антропогенным выбросам и загрязнителям. В отличие от природных, число антропогенных загрязнителей не бесконечно, хотя и чрезвычайно велико. За редким исключением они не находят своего места в круговороте веществ без нарушения цикличности и замкнутости естественных процессов, чем и наносят ущерб природе планеты. Наиболее заметные из них становятся объектами изучения и разработки способов нейтрализации воздействия на биосферу.

Очевидно, что человеку прежде всего заметны вещества, наносящие ущерб здоровью и продуктам его труда, и лишь затем — другим объектам окружающей среды. Поэтому исторически создание средств защиты также было направлено на предотвращение в первую очередь непосредственного вреда человеку. Это, естественно, более узкая задача, чем защита биосферы, но и она часто рассматривается не в динамике, а адаптируется к конкретному отрезку времени, соответствующему конструкторской проработке инновационного очистного устройства. Вместе с тем оно проходит определенные стадии жизненного цикла. Далее в книге будут рассматриваться вопросы, касающиеся стадий инженерного моделирования, инновационного менеджмента, проектирования и ввода в эксплуатацию аппаратов пылегазоочистки. Описание последующих стадий их полного жизненного цикла (ПЖЦ) потребовало бы значительного увеличения объема книги и ее выпуска в двух частях; возможно, это задачи будущих изданий.

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПЫЛЕГАЗОВЫЕ ВЫБРОСЫ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ И ВЫБРОСОВ

Выбросы в атмосферу различают по виду, составу, количеству, агрегатному состоянию, характеру появления и пребывания в атмосфере, влиянию на биосферу и множеству других признаков. Классификации антропогенных выбросов, пригодной для изучения их свойств с целью подбора способов очистки, пока нет. В стандартной классификации [7] выбросы в атмосферу из источников загрязнения классифицируются по четырем признакам: по агрегатному состоянию, по химическому составу, по размеру частиц и по массе загрязнителя. Выбросы поделены по агрегатному состоянию на три группы (класса) — газообразные (А), жидкие (Ж) и твердые (Т), по химическому составу — на 26 групп, по размеру частиц — на пять групп (1-я менее $0,5 \cdot 10^{-6}$ м, 5-я от $50 \cdot 10^{-6}$ м) и по массе загрязняющего вещества — на шесть групп (1-я менее 1 кг/ч, 6-я от 10 000 кг/ч). В характеристике по химическому составу приведены 22 вида химических соединений и классов химических соединений, смолистые вещества, сажа, пыль. Все остальное множество загрязнителей (более 600 по нормативам ПДК; в целом — около 1 млн видов веществ, выбрасываемых в атмосферу планеты) сведено в группу № 26 «Прочие».

Существующая классификация качественно лучше первоначального варианта, однако еще требует определенной оптимизации. Газообразные загрязнители было бы целесообразнее привязать к нормативам ПДК, указав на классы опасности воздействия на организм человека без конкретизации каждого вещества, и выделить конкретно загрязнители глобального действия по Монреальскому и Киотскому спискам. Принцип распределения взвешенных частиц по размеру малопонятен, ввиду чего на практике более употребительна классификация по US EPA. В настоящее время идентичную классификацию начинают вводить и в России ([8], см. разд. «Нормирование в области охраны воздушной среды»). Недостаточно информа-

тивна в существующем виде классификация выбросов по массе загрязняющего вещества. Ее следовало бы дополнить признаками источника выброса — как минимум типом источника и физическими параметрами выброса.

В ГОСТе также приводится схема маркировки выбросов и загрязнителей, составляемая по индексам групп (рис. 1).

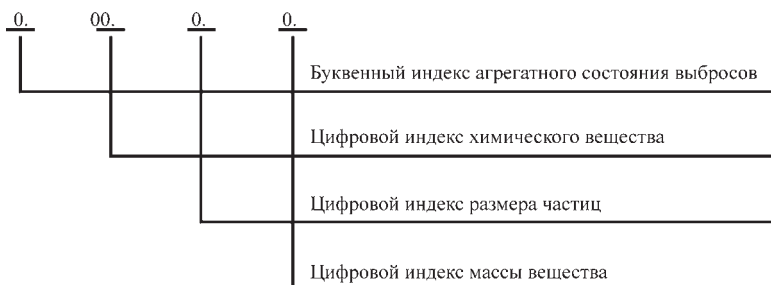


Рис. 1

Структура построения условного обозначения выбросов по ГОСТ 17.2.1.01-76 (измененная редакция, изм. № 1)

По примеру, приведенному в стандарте, выброс, состоящий из сернистого ангидрида с массой 2000 кг/ч, кислоты размером частиц от 0,5 до 3 мкм и массой 50 кг/ч, сажи с размером частиц 1 мкм и массой 60 кг/ч, должен обозначаться как А.01.0.5.К.20.2.3.Т.23.2.3.

К сожалению, многие виды выбросов и загрязнителей однозначно не идентифицируются и в измененной редакции стандарта. Так, продукты сгорания жидких и твердых топлив содержат золу, которая, как и в первоначальном варианте, не подходит индивидуально ни к одной из 26 групп в классе характеристик «по химическому составу». В том числе ее нельзя отнести и к группе «Прочие» из-за содержания металлов и их соединений (включая свинец), органической и неорганической частей, сажистых и смолистых веществ, т. е. всего, что содержится в предыдущих группах.

Несмотря на указанные недостатки, ряд положений стандартной классификации, так же как и стандартная терминология, будут употребляться в дальнейшем изложении.

1.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ И ВЫБРОСОВ

Степень воздействия загрязнителей на окружающую среду и эффективность очистки выбросов зависят от их свойств, которые в принципе могут быть заданы набором физико-химических характеристик всех ингредиентов. Однако имеются объективные трудности, не позволяющие учесть всей совокупности процессов, происходящих в смеси хотя бы нескольких веществ. Поэтому обычно рассматривают лишь один или два основных (по количеству или токсичности) загрязнителя и один наиболее характерный для данных условий процесс. Реальные процессы описывают упрощенными математическими моделями. Например, дисперсные выбросы с небольшим содержанием взвешенных частиц, такие как воздух с невысокой запыленностью, продукты сгорания газо-

вого, жидкого и даже малозольных сортов твердого топлива, рассматривают как гомогенные. Если же наличие взвешенных частиц оказывает существенное влияние на свойства выбросов, то дисперсную и гомогенную части аэрозоля рассматривают отдельно, как две независимые системы. При этом гомогенную часть отождествляют с моделью идеального газа, а для описания свойств дисперсной части используют какие-либо математические модели, например нормального или логарифмически нормального распределения частиц по размерам. В технических расчетах гомогенных смесей не учитывают возможность фазовых или химических превращений, если они не вносят явных отклонений в свойства системы. Это позволяет использовать модель идеальной газовой смеси для большинства гомогенных выбросов.

Химические составы выбросов реальных производственных процессов изучены слабо. Поэтому зачастую в практических инженерных расчетах выбросы отождествляют либо с воздухом, либо с продуктами сгорания соответствующего топлива усредненного состава, содержащими незначительное количество (по сравнению с содержанием ингредиентов газа-носителя) вредной примеси. Свойства такой системы определяют, складывая величины соответствующих характеристик ингредиентов, взятые пропорционально их содержанию в смеси.

В ряде случаев подобное правило сложения (аддитивности) заведомо непригодно, например в системах с интенсивными фазовыми или химическими превращениями, со значительным содержанием взвешенных частиц. Тогда приходится использовать эмпирические данные по сходным системам, а при их отсутствии — проводить натурные испытания. В качестве модели для изучения свойств смесей сложного состава, компоненты которых находятся в различных агрегатных состояниях, принимают модель так называемого реального газа, которая объединяет в себе некомпактные состояния вещества с различной степенью агрегированности молекул. В понятие «реальный газ» могут быть включены состояния перегретого пара (т.е. практически идеального газа), насыщенного сухого и влажного пара, пара над твердой или жидкой поверхностью. В технике это понятие иногда распространяют и на некоторые виды аэрозолей.

Любые вещества и их смеси при определенных значениях давления p , температуры T и удельного объема v системы могут пребывать в твердом, жидком, газообразном или переходном состоянии. На рисунке 2 показаны термодинамические поверхности агрегатных состояний индивидуальных веществ и смесей и их проекции на координатные плоскости p - T и T - v . Проекции поверхностей на плоскость p - v сходны с их 3d-изображениями и не показаны, чтобы излишне не загромождать рисунок.

Область твердого состояния индивидуального вещества S_i представляется термодинамической поверхностью, образованной линиями возгонки (сублимации, от *lat. sublimo* — возношу) F_iE_i и плавления E_iD_i . На диаграмме p - T область S_i располагается между ними и осью координат p , а на диаграмме T - v она проецируется в линию F_iE_i . Кривая сублимации F_iE_i одновременно представляет и значения давления пара над твердым веществом в условиях равновесия при соответствующих температурах (изотермы вертикальны). Линия равновесного состояния трех фаз $E_iA_iB_i$ на диаграммах p - v и T - v отображается в p - T -координатах точкой A_i (или E_i , или B_i).

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru