

# 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 обсчитываются 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 ретро-градный 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

**С**табильность роста загрязнения окружающей среды позволила, 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 вредностей 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. Порохинным, глава 6 — А. А. Колесником. Общее редактирование выполнено В. Н. Порохиным.

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/м<sup>3</sup> (в экономических расчетах — эксплуатационные расходы)  
*c* — теплоемкость, Дж/(кг·°С)  
*D* — диаметр, м; коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/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, м<sup>2</sup>  
*G* — свободная энталпия, Дж; расход газовой фазы, м<sup>3</sup>/с  
*g* — массовая доля; ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>  
*h* — высота, м  
*I* — энталпия, Дж  
*j* — поток массы, кг/с  
*K* — кинетическая энергия, Дж; коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), или массопередачи, кг / (м<sup>2</sup>·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/м<sup>3</sup>

$q$  — 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, м<sup>3</sup>  
 $v$  — удельный объем, м<sup>3</sup>/кг  
 $W$  — расход, м<sup>3</sup>/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/м<sup>3</sup>; коэффициент сжимаемости; коэффициент аффинности  
 $\Lambda$  — коэффициент избытка воздуха, самосогласованная величина  
 $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха по топливу; коэффициент теплоотдачи Вт/(м<sup>2</sup>·°С), степень диссоциации вещества в химической реакции, коэффициент разветвления цепей  
 $\beta$  — вспомогательный коэффициент избытка воздуха; коэффициент массоотдачи, коэффициент диссоциации, коэффициент обрыва цепей  
 $\gamma$  — вспомогательный коэффициент избытка воздуха  
 $\delta$  — расстояние, шаг, м  
 $\epsilon$  — коэффициент проскака; порозность слоя; газонасыщение слоя ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/\text{м}$  — диэлектрическая постоянная вакуума)  
 $\zeta$  — коэффициент местного сопротивления  
 $\eta$  — динамический коэффициент вязкости, Па·с; степень очистки  
 $\iota$  — коэффициент использования топлива  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)  
 $\mu$  — молярная масса  
 $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с  
 $\xi$  — мера реакции  
 $\Pi$  — произведение  
 $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_s$  — оптическая плотность)  
 $\Sigma$  — сумма  
 $\sigma$  — дисперсия; поверхностное натяжение, Н/м  
 $T$  — безразмерный временной параметр  
 $\tau$  — время, с  
 $\varphi$  — относительная влажность  
 $\Psi$  — коэффициент Генри, Па<sup>-1</sup>  
 $\psi$  — химический потенциал, Дж/кг

## ИНДЕКСЫ УСЛОВИЙ

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

## ИНДЕКСЫ СОСТОЯНИЙ

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

## ИНДЕКСЫ ПРОЦЕССОВ

*ab* — абсорбция  
*ad* — адсорбция  
*bl* — кипение, котел, бойлер  
*cm* — горение

*cn* — конденсация

*ds* — десорбция

*ev* — испарение

*P* — изобарный

*V* — изохорный

*T* — изотермический

*I* — изоэнталпийный

*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* — пиromетрический  
*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

**Н**аша 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 катализмов, 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.

### 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), жидкые (К) 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).

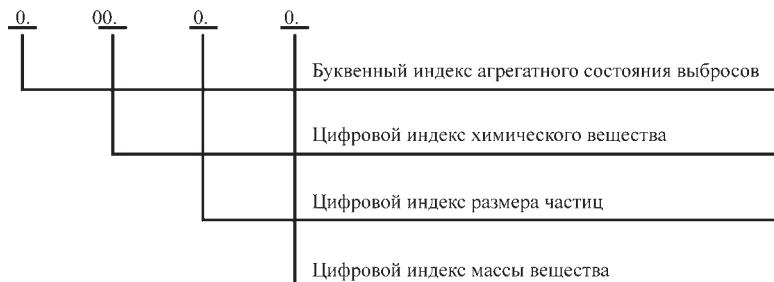


Рис. 1

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 жидкких 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 неоганической 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 раздельно, 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 не-пригодно, например в системах с интесивными 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 лат. *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](http://e-Univers.ru)