

Канд. техн. наук **В.Н. БОНДАРЕВ**
 Научно-промышленная ассоциация
 производителей холодильного оборудования
 «Холодпром»,
М.Ф. ОНУЧИН
 ЗАО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа»

Выбор предпочтительной единицы давления

Многолетняя практика использования Международной системы единиц СИ (SI) согласно ГОСТ 8.417-81 «Единицы физических величин» показала, что применение предлагаемых в ней единиц давления приводит при расчетах к произвольным и непроизвольным ошибкам. Рассмотрим причины возникающих недоразумений и возможность избежать их.

Метрическая система МКГСС. Единица силы, силы тяжести $F = (\text{единица массы}) \cdot (\text{величина ускорения, равная стандартному ускорению свободного падения}) = 1(\text{кг-масса}) \times 9,806\,65 \text{ м/с}^2 = 9,806\,65 (\text{кг-масса}) \cdot \text{м/с}^2$. Для удобства и упрощения расчетов эта дробная единица силы условно обозначена как 1 (килограмм-сила) = 1 кгс.

Единица давления $p = F/S = 1 \text{ кгс/м}^2$ (0,073 556 1 мм рт. ст.).

По своему значению данная основная единица давления далека от получившей всеобщее мировое признание величины нормального давления, которая точно соответствует величине физической атмосферы 1 атм, равной среднему барометрическому давлению 760 мм рт. ст., измеряемому ртутным барометром на уровне моря при температуре столба ртути 0 °С. Наиболее близкой к величине 1 атм оказалась десятичная кратная единица давления с размерностью кгс/см², названная технической атмосферой: $1 \text{ ат} = 1 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 1 \text{ кгс/см}^2$ (735,561 мм рт. ст.).

Техническая атмосфера не соответствует ряду стандартизированных десятичных кратных единиц физических величин. Тем не менее она получила широкое распространение в большинстве стран мира благодаря своей близости к наиболее естественной для человека величине атмосферного давления.

Отношение $1 \text{ атм}/1 \text{ ат} = 1,033\,22$ характеризует степень близости величины технической атмосферы к величине физической атмосферы. Любые значения абсолютного или избыточного давления, выраженные в технических атмосферах, легко осмысляются, так как являются практически кратными или дольными единицами от величины атмосферного давления, которая играет существенную роль при создании компрессорного и другого оборудования в различных областях техники.

Международная система единиц СИ.

Единица силы, силы тяжести $F = 1 (\text{кг-масса}) \cdot 1 \text{ м/с}^2 = 1 \text{ ньютон} = 1 \text{ Н}$.

Единицей давления и напряжения согласно принятой в 1960 г. Международной системе СИ является 1 паскаль: $p = F/S = 1 \text{ кг/(м} \cdot \text{с}^2) = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ паскаль} = 1 \text{ Па}$ (7,500 64 · 10⁻³ мм рт. ст.).

Для устранения неудобств применения основных и производных единиц системой СИ допускается использование десятичных дольных и кратных единиц, которые образуются умножением исходных единиц на один из множителей M , получаемых из уравнения $M = 10^n$, где n — целое отрицательное или положительное число в диапазоне от -6 до +6. В результате применения данного уравнения для образования

десятичных кратных единиц образуется следующий ряд: $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{18}$, т.е. кило-, мега-, гига-, тера-, пета- и экса-. Впоследствии этот ряд был дополнен внесистемными числами $1 \cdot 10^1$ и $1 \cdot 10^2$, т.е. дека- и гекто-.

Установленные в системе СИ десятичные кратные паскалю единицы давления:

- 1 декапаскаль = 1 даПа = $1 \cdot 10^1 \text{ Па}$;
- 1 гектопаскаль = 1 гПа = $1 \cdot 10^2 \text{ Па}$;
- 1 килопаскаль = 1 кПа = $1 \cdot 10^3 \text{ Па}$ (7,500 64 мм рт. ст.);
- 1 мегапаскаль = 1 МПа = $1 \cdot 10^6 \text{ Па}$ (7 500,64 мм рт. ст.);
- 1 гигапаскаль = 1 ГПа = $1 \cdot 10^9 \text{ Па}$ и т.д.

Заметим, что все стандартизированные в системе СИ десятичные кратные паскалю единицы давления далеки по своей величине от нормального давления (760 мм рт. ст.).

Степень близости величин 1 МПа и 1 кПа к величине нормального давления составляет соответственно 0,1013 и 101,3.

Отношения между единицами давления в системах единиц МКГСС и СИ.

$1 \text{ ат} = 98\,066,5 \text{ Па} = 9\,806,65 \text{ даПа} = 98,066 \text{ кПа} = 0,098\,0665 \text{ МПа} = 0,980\,665 \cdot 10^{-4} \text{ ГПа}$;

$1 \text{ атм} = 101\,325 \text{ Па} = 10\,132,5 \text{ даПа} = 101,325 \text{ кПа} = 0,101\,325 \text{ МПа} = 0,101\,325 \cdot 10^{-3} \text{ ГПа}$.

Заметим, что пересчет целых числовых значений давления с размерностью кгс/см² в числовые значения давления с размерностью $1 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ (1 МПа) не приводит к целым числам.

Последствия перехода на новую единицу величины давления. В процессе осмысления числовых значений давления человеку наиболее естественно сопоставлять эти значения с обычной для него величиной атмосферного давления точно так же, как осмысляются космические расстояния с помощью единицы длины световой год, равной $9,46 \cdot 10^{15} \text{ км}$. В компрессоростроении имеют дело чаще всего с давлениями, равными атмосферному давлению на суше и выше него. Однако в соответствии с ГОСТ 8.417-81 эти величины давления приходится измерять смежными с физической атмосферой и довольно далекими от величины барометрического давления десятичными кратными паскалю единицами:

1 МПа (7500,64 мм рт. ст.) или 1 кПа (7,500 64 мм рт. ст.).

Действительно, в процессе осмысления заявленных значений давления, выраженных в мегапаскалях или килопаскалях, возникает интуитивная потребность в сопоставлении этих значений с атмосферным давлением путем пересчета с использованием равенств

$1 \text{ кПа} = 0,010\,197\,16 \text{ ат}$ или $1 \text{ МПа} = 10,197\,16 \text{ ат}$.

При этом возникают крупные непроизвольные ошибки в тех случаях, когда необходимый для осмысления пересчет чисел машинально забывают произвести. Кроме того, для упрощения пересчета обычно применяют приблизительные равенства $0,1 \text{ МПа} \approx 1 \text{ ат}$ и $100 \text{ кПа} \approx 1 \text{ ат}$, что приводит к произвольной ошибке, равной 1,97 %.

Основная причина показанных неудобств и возможных ошибок кроется в том, что имеющаяся в наличии кратная паскалю единица давления 1 бар, равная $1 \cdot 10^5$ Па (точно) и по своей величине близкая к нормальному давлению, объявлена в системе СИ внесистемной единицей и допускается к практическому применению временно из-за несоответствия ряду формально стандартизированных десятичных кратных паскалю единиц давления. В связи с этим в бывшем СССР было принято неосмотрительное решение: не рекомендовать к практическому применению единицу давления 1 бар, что и было зафиксировано в ГОСТ 8.417-81 со всеми вытекающими отсюда последствиями.

В 1968 г. было принято международное соглашение установить внесистемную единицу $2 \cdot 10^5$ Па в качестве исходного уровня звукового давления. Более того, под давлением общности было принято решение допускать временно (без указания срока) использование других единиц, в том числе единицы измерения частоты вращения с размерностями об/с и об/мин, а также давления с размерностью бар. С целью достижения единообразия в результатах измерения механического напряжения принята единица 1 Н/мм^2 .

Кратная единица давления, временно допускаемая в системе СИ. Единица давления 1 бар = $1 \cdot 10^5 \text{ кг/(м} \cdot \text{с}^2) = 1 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ точно. Отношения единицы 1 бар с единицами давления в системе МКГСС: 1 бар = 1,019 716 ат = 0,986 926 атм; 1 ат = 0,980 665 бар. Степень близости величины 1 бар к величине нормального давления составляет: 1 атм/1 бар = 1,013 25.

Единица давления 1 бар не соответствует нормализованному ряду десятичных кратных единиц (1 бар = $1 \cdot 10^5$ Па точно), но она кратна паскалю и практически совпадает с наиболее естественной для человека среднегодовой величиной атмосферного давления (1 бар = 750,064 мм рт. ст.), с получившей мировое признание величиной нормального давления 760 мм рт. ст., а также с технической (1 бар = 1,019 716 ат) и физической (1 бар = 0,986 926 атм) атмосферой. Заметим, что величина 1 бар находится между величинами 1 ат и 1 атм, а также почти совпадает

со средней величиной обычно наблюдаемого барометрического давления на суше в равнинной местности. Допущение равенства 1 ат = 1 бар хотя и приводит к произвольной ошибке в 1,36 % при пересчетах, но эта ошибка на 31 % меньше произвольной ошибки, возникающей при допущении равенства 1 ат = 0,1 МПа.

Единица измерения 1 бар удобна в применении практически во всем диапазоне наиболее часто встречающихся в технике контролируемых величин избыточного и абсолютного давлений, а именно:

от 1 миллибар = 1 мбар = 0,001 бар до 10 килобар = 10 000 бар.

Следовательно, стандарти-

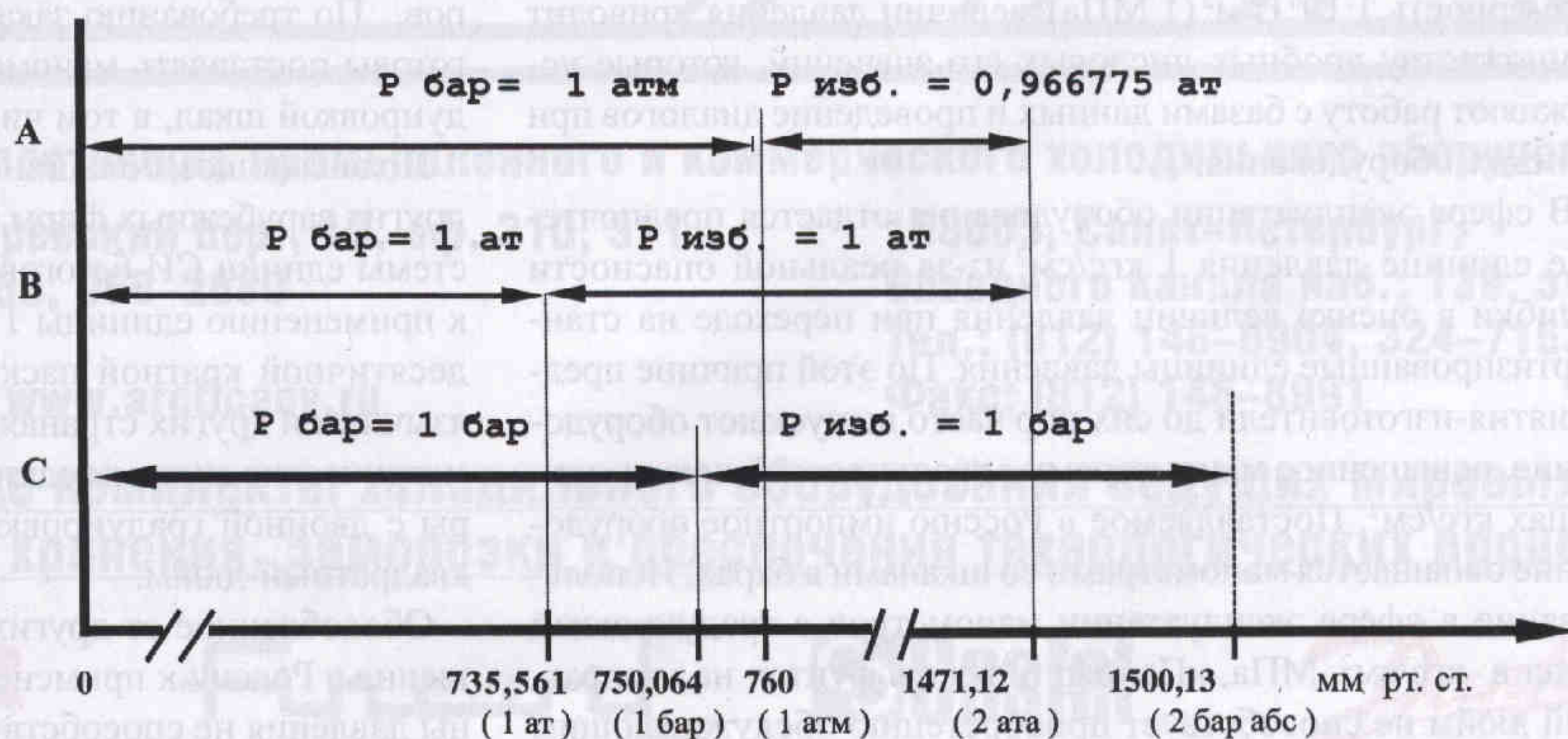
зированные десятичные кратные паскалю единицы давления, предназначенные для давлений в диапазоне от 1 гПа = $1 \cdot 10^2$ Па до 1 ГПа = $1 \cdot 10^9$ Па оказалось возможным заменить близкой к нормальному давлению и временно (без указания срока) допускаемой к практическому применению системой СИ одной единицей 1 бар.

Абсолютное значение давления, выраженное через бар, можно условно обозначить как $p_{\text{абс. бар}}$, а избыточное давление — $p_{\text{изб. бар}}$. Поскольку 1 бар практически совпадает со средней величиной изменяющегося барометрического давления на суше в равнинной местности, в обычных инженерных расчетах компрессорного и другого оборудования с достаточной степенью точности можно допустить равенство $p_{\text{изб. бар}} = p_{\text{абс. бар}} - 1 \text{ бар}$. Следовательно, при целых числах задаваемого в барах абсолютного давления можно получать целые числовые значения в барах и для избыточного манометрического давления (см. рисунок). Рассчитанное с учетом равенства $p_{\text{изб. бар}} = p_{\text{абс. бар}} - 1 \text{ бар}$ компрессорное и другое оборудование будет эксплуатироваться в более близких к расчетным условиям, нежели оборудование, рассчитываемое в настоящее время с учетом равенства $p_{\text{изб. МПа}} = p_{\text{абс. МПа}} - 0,0981 \text{ МПа}$.

Практически все зарубежные компрессоростроительные и другие фирмы при переходе на Международную систему единиц СИ безоговорочно приняли решение применять временно допускаемую десятичную кратную паскалю единицу 1 бар в качестве предпочтительной кратной единицы давления. Такое решение объясняется необходимостью, которая подобна необходимости постоянно допускать к практическому применению внесистемные единицы год, месяц, сутки, час, мин, астрономическая единица, световой год и т.д.

В текстах стандартов, разработанных Международной организацией по стандартизации, используется размерность бар наравне с размерностями Па, даПа, гПа, кПа, МПа и др.

В отличие от российских известные зарубежные издательства научно-технической литературы проводят демократическую политику в отношении используемых авторами ста-



Численный пример влияния выбираемого значения барометрического давления на значение избыточного давления при заданном для расчета оборудования абсолютном значении давления:

A — выбор барометрического давления 1 атм = 760 мм рт. ст. при заданном абсолютном давлении 2 ата.

B — выбор барометрического давления 1 ат = 735,561 мм рт. ст. при заданном абс. давлении 2 ата.

C — выбор барометрического давления 1 бар = 750,064 мм рт. ст. при заданном абс. давлении 2 бар абс.

Примечание. Среднегодовое значение барометрического давления в Москве составляет 750 мм рт. ст.

тей единиц давления. К опубликованию принимаются материалы, в которых величины давлений выражены в прежних или в новых единицах. В подавляющем большинстве публикаций за последние годы численные значения давлений выражены через размерность бар.

Известно, что любое временно допускаемое в каком-либо законе положение вызвано необходимостью, которая через определенный период времени предположительно должна потерять свою актуальность. В тех случаях, когда необходимость продолжает сохранять востребованность, временно допускаемое положение остается постоянно действующим. Нечто подобное произошло с единицей 1 бар, востребованность которой остается и после более чем 40-летнего освоения системы единиц СИ. Международную рекомендацию допускать временно к практическому применению внесистемные единицы бар, об/с, об/мин, морская миля, карат и некоторые другие единицы следует рассматривать как предложение выяснить со временем (без указания срока) необходимость их применения постоянно, а не как закон, требующий срочно исключить эти единицы из обращения.

Попытка силовым государственным решением в бывшем СССР всемерно избегать применения единиц давления мм рт. ст., мм вод. ст., кгс/см² и бар не привела к желаемым результатам. В физических исследованиях и испытаниях оборудования по-прежнему применяются единицы давления мм рт. ст. и мм вод. ст. Техдокументация на оборудование разрабатывается с расточительным параллельным использованием МПа (или кПа) и кгс/см² не без возможных при пересчетах произвольных и произвольных ошибок.

Много ошибок возникает в пересчетах величин давления при многочисленных поисках необходимого заказчикам оборудования с помощью ранее созданных в ЦИНТИхимнефтемаше на основе единицы давления 1 ат баз данных АФИПС (автоматизированных фактографических информационно-поисковых систем) по компрессорному, холодильному и другому оборудованию. Актуализация и перевод баз данных на размерность $1 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ (1 МПа) величин давления приводит к множеству дробных числовых его значений, которые усложняют работу с базами данных и проведение диалогов при поисках оборудования.

В сфере эксплуатации оборудования отдается предпочтение единице давления 1 кгс/см² из-за реальной опасности ошибки в оценке величин давления при переходе на стандартизированные единицы давления. По этой причине предприятия-изготовители до сих пор часто выпускают оборудование, оснащенное манометрами с градуировкой шкал в единицах кгс/см². Поставляемое в Россию импортное оборудование оснащается манометрами со шкалами в барах. Использование в сфере эксплуатации манометров с градуировкой шкал в кгс/см², МПа, кПа, бар и даже в фунтах на квадратный дюйм не способствует приобретению обслуживающим персоналом необходимых четких навыков в оценке величин давления.

Все перечисленные и, возможно, упущенные недостатки можно исключить применением единицы давления 1 бар.

Выводы. Популярность той или иной единицы измерения зависит в первую очередь от равенства ее значения

какой-либо из естественных для человека величин. Проверка временем показала, что формальный подход при стандартизации десятичных кратных паскалю единиц без учета указанного фактора не приводит к желаемым результатам. Популярность единиц кгс/см², мм рт.ст. и мм вод.ст. остается по-прежнему высокой точно так же, как популярность полученных ранее на основе естественных для человека исходных величин многих внесистемных единиц, в том числе карат, морская миля, астрономическая единица, световой год, сутки, месяц, год, об/мин, об/ч и т.д., в связи с удобством их восприятия по сравнению с подобными единицами, регламентированными Международной системой единиц СИ.

Представляется необходимым дополнить ряд стандартизированных в ГОСТ 8.417–81 десятичных кратных паскалю единиц давления весьма важной для компрессоростроения и других областей техники единицей давления в барах в следующем порядке: 1 кПа ($1 \cdot 10^3$ Па), 1 бар ($1 \cdot 10^5$ Па), 1 МПа ($1 \cdot 10^6$ Па) и далее без изменения.

Ряд выраженных в технических атмосферах предпочтительных чисел по ГОСТ 12445–80, в соответствии с требованиями которого выбирают номинальные значения давлений для разрабатываемого оборудования, может быть адаптирован к кратной единице давления 1 бар без каких-либо технических и других затруднений.

В базах данных АФИПС по компрессорному и другому оборудованию вполне допустимо сохранить для решения информационных задач ранее введенное большое множество цифровых значений давления в технических атмосферах без пересчета (путем простой замены размерности кгс/см² на размерность бар, так как 1 ат = 0,981 бар).

Использование единицы 1 бар позволяет сохранить и применять в дальнейшем привычный вид марок компрессорного и другого оборудования, в унифицированные обозначения которых входят для информативности числовые значения давления.

Применение размерности бар не сдерживается отечественной промышленностью контрольно-измерительных приборов. По требованию заказчиков предприятия-изготовители готовы поставлять манометры и вакуумметры с любой градуировкой шкал, в том числе с двойной.

Подавляющее большинство компрессоростроительных и других зарубежных фирм при освоении Международной системы единиц СИ безоговорочно приняли решение перейти к применению единицы 1 бар в качестве предпочтительной десятичной кратной паскалю единицы давления. В англоязычных и других странах, в которых ранее применялись неметрические системы единиц, сейчас используются манометры с двойной градуировкой шкалы: в барах и в фунтах на квадратный дюйм.

Обособленное от других стран мира отрицательное отношение в России к применению бар для обозначения величины давления не способствует процессу мировой интеграции в преподавании, а также в исследовании, производстве и эксплуатации оборудования, работающего под давлением и вакуумом.

Таким образом, в настоящее время нет причин отказа от обозначения величины бар для давления и нет оснований прогнозировать отказ от нее в обозримом будущем.