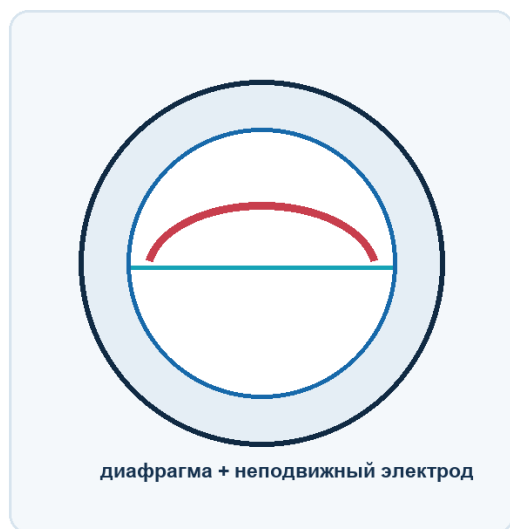


Мембранно-ёмкостные вакуумметры

LeakLab CM1: принцип работы, метрология и сравнение с MKS и INFICON

Мембранно-ёмкостный вакуумметр LeakLab CM1

Научный обзор, сравнение и инженерный выбор



диафрагма + неподвижный электрод

3 исполнения

без подогрева, 45 °C, 100 °C

0,02–1000 Torr

набор отдельных полных шкал

0–10 VDC

линейный аналоговый выход

<20 мс

паспортное время отклика

6,3 см³

внутренний объём

310 кПа

предел перегрузки

LeakLab CM1 | источник чисел: OEM-каталог CBVAC, ревизия 20.11.2025

Мембранно-ёмкостный вакуумметр LeakLab CM1

Мембранно-ёмкостный вакуумметр LeakLab CM1 относится к классу capacitance diaphragm gauge, CDG: абсолютное давление преобразуется в микроскопический прогиб упругой мембраны, а прогиб — в изменение электрической ёмкости. В отличие от тепловых и ионизационных датчиков, такой преобразователь измеряет механическое действие полного давления и поэтому в первом приближении не требует коэффициента чувствительности для каждого газа. Это важное преимущество в вакуумных технологических установках, газовых системах, установках напыления, плазменных процессах, исследовательских стендах и оборудовании дозирования давления.

LeakLab CM1 производится компанией CBVAC по OEM-схеме для лаборатории LeakLab. Серия выпускается без подогрева, с термостатированием 45 °C и 100 °C. В зависимости от исполнения выбирается одна полная шкала из семейства от 0,02 до 1000 Torr. Эта формулировка принципиальна: диапазон серии не является диапазоном одного датчика. Например, исполнение 1000 Torr не получает паспортную точность на уровне 0,02 Torr, а датчик 0,02 Torr не предназначен для атмосферного давления.

В статье разобраны физика измерительной ячейки, устройство опорной полости, влияние температуры, нулевой дрейф, загрязнение, монтажная ориентация, выбор полной шкалы, процедура обнуления и калибровки. Выполнено прямое сравнение LeakLab CM1 с MKS 626D/627H/628H и INFICON Porter/SKY CDG. Отдельно показано, почему высокотемпературные MKS 631F и DA03B, INFICON SKY 160D/200D, а также референсные MKS AA06A и INFICON Cube CDGsci относятся к другим уровням задачи и не должны смешиваться с производственным CM1.

Важное ограничение: совпадение принципа, полной шкалы, выхода 0–10 V и даже разъёма DB15 не доказывает механическую, электрическую, метрологическую или процессную взаимозаменяемость. Для замены конкретного прибора сравнивают полные part number и условия эксплуатации.

1. От давления к ёмкости: физическая модель CDG

Базовая ячейка состоит из корпуса, тонкой круглой мембраны, неподвижного электрода и опорной полости. Процессное давление действует на одну сторону мембраны. На другой стороне поддерживается опорное давление, обычно значительно ниже нижней границы измерения. Разность давлений создаёт прогиб. Если эффективная площадь электрода равна A , диэлектрическая проницаемость зазора — ϵ , а средний зазор — d , то в грубом плоскопараллельном приближении ёмкость C описывается отношением $C \approx \epsilon A/d$. Реальная мембрана искривляется неравномерно, поэтому точная функция учитывает профиль прогиба, краевые эффекты и охранный электрод.

Для изотропной круглой пластины радиуса a , закреплённой по краю, при малом прогибе центральное перемещение пропорционально разности давлений Δp и a^4 и обратно пропорционально изгибной жёсткости $D = Et^3/[12(1-\nu^2)]$, где E — модуль Юнга, t — толщина, ν — коэффициент Пуассона. Эта модель полезна для понимания чувствительности, но не заменяет заводскую калибровочную функцию. При увеличении прогиба появляются мембранные напряжения, нелинейность и зависимость от остаточных напряжений после сварки и термообработки.

Конструктор балансирует противоречивые требования. Тонкая мембрана повышает чувствительность низкой полной шкалы, но усиливает влияние гравитации, вибрации, перегрузки и остаточных напряжений. Малый зазор увеличивает электрическую

чувствительность, но повышает требования к плоскостности и чистоте. Большая площадь увеличивает сигнал, но увеличивает размеры и чувствительность к температурным градиентам. Именно поэтому модели с разными FS являются отдельными механическими и метрологическими исполнениями.

Как CDG превращает давление в электрический сигнал

Схема принципа измерения, без привязки к внутренней геометрии конкретного изделия



Газонезависимость принципа не отменяет температурную транспирацию, дрейф нуля и загрязнение.

LeakLab CM1 | источник чисел: OEM-каталог CBVAC, ревизия 20.11.2025

Принцип действия CDG

2. Абсолютная ячейка и опорная вакуумная полость

CM1 является абсолютным преобразователем: показание определяется относительно герметичной опорной полости, а не относительно атмосферного давления. Качество этой полости непосредственно связано со стабильностью нуля. Остаточный газ, газовыделение внутренних поверхностей, микропроницаемость соединений и термические циклы могут изменить опорное давление. Поэтому полностью сварная конструкция, выбор материалов, вакуумная обработка и герметизация являются частью метрологической архитектуры.

Нулевой сигнал включает не только остаточное давление в опорной полости. В него входят начальный геометрический зазор, напряжённое состояние мембраны, электрический offset мостовой схемы, паразитные ёмкости разъёма и кабеля, температурные градиенты, положение датчика относительно силы тяжести и история

перегрузок. Функция zero adjust компенсирует наблюдаемый offset в конкретный момент, но не устраняет физическую причину дрейфа.

Для низких полных шкал гравитационный прогиб может стать сопоставимым с полезным сигналом. Поэтому каталог CM1 оговаривает горизонтальную или вертикальную калибровку чувствительных диапазонов. После изменения ориентации правильная последовательность включает механическую фиксацию, стабилизацию температуры, достижение достаточно низкого давления, выдержку и повторную установку нуля. Перенос значения zero между разными ориентациями без проверки создаёт систематическую ошибку.

3. Электрическая схема, охранные электроды и линеаризация

Изменение ёмкости невелико по сравнению с паразитными ёмкостями корпуса, кабеля и печатной платы. Поэтому CDG использует переменное возбуждение, мостовую или дифференциальную схему, синхронное детектирование, температурную коррекцию и линеаризацию. Охранный электрод формирует электрическое поле в рабочей области и уменьшает вклад краёв. Экран и отдельная сигнальная земля помогают избежать контуров тока и помех привода, нагревателя или частотного преобразователя насоса.

У LeakLab CM1 паспортный аналоговый выход составляет 0–10 VDC и линейно пропорционален давлению при нагрузке более 10 кОм. Для идеализированной шкалы давление вычисляется как $p = FS \times U/10 \text{ V}$. Этот расчёт верен только для согласованного исполнения и при отсутствии пользовательского смещения. Нельзя переносить коэффициент одного датчика на другой только потому, что оба имеют DB15.

Каталог показывает DB15 Male: pin 2 — положительный сигнальный выход, pin 5 — общая шина питания, pin 6 — -15 VDC, pin 7 — +15 VDC, pin 12 — сигнальная общая, pin 15 — корпусная земля. Для внешнего пятиконтактного исполнения указаны: 1 — voltage common, 2 — signal common, 3 — signal output, 4 — -15 VDC, 5 — +15 VDC. Перед подключением поставляемого прибора распиновку всё равно проверяют по паспорту конкретного кода заказа.

4. Почему показание почти не зависит от газа

Тепловой вакуумметр оценивает теплопередачу от нагретого элемента к газу, а ионизационный — ток ионов, зависящий от сечения ионизации. Для обоих классов род газа влияет на чувствительность. CDG измеряет силу, создаваемую суммарным давлением на мембране, поэтому азот, аргон, гелий или технологическая смесь при одинаковом механическом давлении дают одинаковую основу сигнала.

Фраза «газозависимое измерение» не означает отсутствия всех газовых эффектов. При низком давлении и различии температур между горячей ячейкой и холодной камерой возникает температурная транспирация. Давление у мембраны может отличаться от давления в камере, а величина поправки зависит от геометрии соединительной трубки, режима Кнудсена, газа и отношения температур. На результат также влияют сорбция, конденсация, химическая реакция с поверхностью и осаждение частиц.

Поэтому для сопоставимых измерений задают одинаковую конфигурацию линии, температуру, положение и время стабилизации. Если нагретый датчик сравнивается с холодным эталоном, температурная транспирация должна быть включена в модель измерения и бюджет неопределённости, особенно в области низких FS.

5. Температура: без подогрева, 45 °C и 100 °C

Температура одновременно влияет на модуль упругости, размеры зазора, остаточные напряжения, электронный offset и поведение технологических паров. Исполнение без подогрева проще и экономичнее, но сильнее следует за температурой окружающей среды. Термостатирование 45 °C стабилизирует механическую и электрическую часть и помогает низким шкалам. Исполнение 100 °C полезно там, где необходимо снизить вероятность конденсации на пути к мембране.

Подогрев не превращает датчик в самоочищающийся. Если температура стенки ниже точки росы смеси, осаждение возможно. Если частицы или продукты плазмы достигают мембраны, они изменяют массу, напряжение и электрический зазор. Если среда химически несовместима с никелевым сплавом или материалом присоединения, повышение температуры может ускорить реакцию. Поэтому решение включает температуру датчика, обогрев линии, длину и диаметр отвода, положение порта, защитный элемент и регламент обслуживания.

В OEM-каталоге CM1 указаны температурные коэффициенты нуля. Для исполнения без подогрева это 0,005 % FS/°C для 10–1000 Torr, 0,01 % FS/°C для 2 Torr, 0,015 % FS/°C для 1 Torr и 0,02 % FS/°C для FS ниже 1 Torr. Для 45 °C: 0,002 % FS/°C для 1–1000 Torr, 0,005 % FS/°C для 0,25 и 0,1 Torr, 0,015 % FS/°C для 0,05 Torr, 0,03 % FS/°C для 0,02 Torr. Для 100 °C: 0,002 % FS/°C для 1–1000 Torr, 0,01 % FS/°C для 0,25 и 0,1 Torr, 0,02 % FS/°C для 0,05 Torr. Эти числа относятся к нулю, а не к общей погрешности.

6. Паспортные характеристики LeakLab CM1

Параметр	Значение по OEM-каталогу
Принцип	ёмкостное измерение деформации мембраны
Температурные исполнения	без подогрева; 45 °C; 100 °C
Полные шкалы без подогрева	0,1; 0,25; 1; 2; 10; 20; 100; 500; 1000 Torr
Полные шкалы 45 °C	0,02; 0,05; 0,1; 0,25; 1; 2; 10; 20; 100; 1000 Torr
Полные шкалы 100 °C	0,05; 0,1; 0,25; 1; 2; 10; 20; 100; 1000 Torr
Выход	0–10 VDC, нагрузка >10 кОм
Питание	±15 VDC ±5 %
Время отклика	менее 20 мс
Разрешение	0,001 % FS; для 0,02 и 0,05 Torr — 0,002 % FS
Контактирующий материал	коррозионностойкий сплав на основе никеля
Конструкция	полностью сварная
Внутренний объём	6,3 см³
Перегрузка	310 кПа
Прогрев	2 ч для FS не ниже 1 Torr; 4 ч для FS ниже 1 Torr
Присоединения	KF, CF, VCR/VCO и трубные варианты по коду заказа

Погрешность исполнения без подогрева указана как 0,5 % от показания для FS ниже 1 Torr и 0,25 % от показания для FS не ниже 1 Torr. Для 100 °C используется такая же группировка. Для 45 °C каталог задаёт 0,25 % от показания для 0,02 Torr и 0,15 % для 0,05, 0,1 и 0,25 Torr, а также формулировку «0,12 % при >0,1 Torr». Поскольку 0,25 Torr попадает в обе группы, источник содержит пересечение условий. До письменного уточнения CBVAC корректно говорить: «до 0,12 % от показания для старших диапазонов; низкие полные шкалы имеют отдельные значения».

Семейство полных шкал CM1

7. Как выбрать полную шкалу

Выбор FS начинается не с минимально достижимого давления насоса, а с диапазона технологического регулирования. CDG обычно наиболее полезен в верхней части своей шкалы, где процент полной шкалы меньше влияет на относительный результат. Если процесс работает около 0,7 Torr, датчик 1 Torr обычно дает более содержательный сигнал, чем 10 Torr, но переходные выбросы, процедура напуска и аварийное давление должны оставаться в допустимых пределах.

Для оценки полезного шага можно умножить разрешение на FS. У исполнения 1 Torr с разрешением 0,001 % FS номинальный шаг равен 10^{-5} Torr, или около $1,33 \times 10^{-3}$ Па. Это не означает такую же абсолютную точность. Если паспортная погрешность задана в процентах от показания, при 0,5 Torr и 0,25 % reading соответствующий вклад равен 0,00125 Torr до учёта нуля, температуры, калибровки и других составляющих.

Для системы с несколькими рабочими областями применяют несколько CDG, либо комбинируют CM1 с широкодиапазонным датчиком другого принципа. Перекрытие шкал позволяет проверять согласованность, но не заменяет эталонную калибровку.

Автоматический выбор канала должен иметь гистерезис, диагностику обрыва и обработку выхода за пределы.

8. Прямое сравнение: CM1, MKS и INFICON

Корректное сравнение строится по температурному классу. CM1 без подогрева сопоставим по назначению с MKS 626D и INFICON SKY CDG025D; бюджетный Porter CDG020D начинается с более высоких FS и имеет существенно грубее разрешение. CM1

45 °C сопоставим с MKS 627H и INFICON SKY CDG045D. CM1 100 °C — с MKS 628H и INFICON SKY CDG100D.

MKS 626D использует металлическую ячейку Inconel/Incoloy, 0–10 V и DB15, а официальный текущий каталог указывает разрешение 0,001 % FS, внутренний объём 6,3 см³ и перегрузку 310 кПа. Сходство с CM1 заметно, но этого недостаточно для объявления полной замены. Проверяются точность нужной FS, ориентация, размеры, присоединение и распиновка.

MKS 627H термостатирован при 45 °C и выпускается с FS от 0,02 Torr. Для части диапазонов заявляется точность до 0,12 % reading, а для низких FS используются отдельные значения. MKS 628H работает при 100 °C; текущая карточка приводит 0,5 % reading ниже 1 Torr и 0,25 % reading от 1 Torr. Эти семейства являются наиболее близкими металлическими ориентирами.

INFICON использует керамические измерительные ячейки. SKY CDG045D при 45 °C имеет официально указанную точность 0,15 % reading, разрешение 0,003 % FS и отклик 30/130 мс в зависимости от режима/FS. SKY CDG100D при 100 °C использует 0,2 или 0,4 % reading по выбранной FS, разрешение 0,003 % FS и 30/130 мс. Porter CDG020D рассчитан на 10–2000 Torr/mbar, 0,5 или 1 % reading, 0,05 % FS и 100 мс. Цифры показывают разные приоритеты: компактность и стоимость, точность, скорость, температура и цифровая интеграция.

Прямые классы сравнения

9. Металлическая или керамическая ячейка

Металлическая ячейка CM1 полностью сварена и использует коррозионностойкий никелевый сплав на контактирующих поверхностях. Преимущества такого подхода — промышленно освоенные сварные соединения, малый объём, стойкость во многих химических средах и привычная механика аналоговых CDG. Ограничения связаны с остаточными сварочными напряжениями, температурной историей, пластической перегрузкой и совместимостью конкретного сплава.

Керамическая ячейка INFICON использует оксид алюминия и металлические/паяные элементы присоединения. Керамика имеет высокую электроизоляцию и воспроизводимые упругие свойства, но итоговая стабильность зависит от конструкции, соединений, чистоты, термостата и электроники. Публикации о керамических мембранах

показывают хорошие результаты, однако не дают основания переносить их на любую модель и любой процесс.

Нельзя научно корректно утверждать, что металлический CM1 всегда точнее керамического SKY или наоборот. Для производственного решения важнее конкретная FS, паспортная accuracy, коэффициент нуля, повторяемость после атмосферных циклов, устойчивость к среде, время отклика и доступность калибровки. Материал является одним из параметров, а не готовым рейтингом.

10. Высокотемпературный и референсный уровни

MKS 631F и DA03B работают при 150–200 °C, а INFICON SKY CDG160D/200D — при 160/200 °C. Эти приборы предназначены для процессов, где 100 °C недостаточно для борьбы с конденсацией и осаждением. Более мощный нагреватель, теплоизоляция, требования к обдуву и горячие уплотнения повышают стоимость и сложность интеграции. DA03B дополнительно предоставляет EtherCAT и быстрый цифровой цикл.

MKS AA06A в сочетании с кондиционером 670C и INFICON Cube CDGsci предназначены для высокоточных и референсных задач. У AA06A отдельная мостовая схема, внешняя электроника и разрешение порядка одной миллионной FS. Cube CDGsci для части диапазонов заявляет точность до 0,025 % reading. Эти показатели нельзя использовать как прямой аргумент против производственного CM1: сравниваются разные архитектуры, бюджеты и требования к эксплуатации.

CM1 рационален там, где требуется промышленный аналоговый CDG с известной полной шкалой, выбранной температурой, быстрым откликом и сервисной поддержкой. Если задача требует 150–200 °C, встроенного EtherCAT или референсной точности, выбор должен перейти к соответствующему классу, а не к маркетинговому обещанию одного универсального датчика.

11. Время отклика и динамика процесса

ОЕМ-каталог CM1 указывает время отклика менее 20 мс. При интерпретации этой характеристики нужно знать определение ступени, фильтрацию, FS, давление до и после скачка и полосу входной системы. Реальный сигнал установки включает проводимость

отвода, объём 6,3 см³, длину трубки, демпфирующий элемент и цифровой фильтр контроллера.

Если датчик подключён через длинную тонкую трубку, скорость выравнивания может быть на порядки медленнее электроники. Защитный baffle или фильтр дополнительно меняет пневматическую передаточную функцию. В быстром плазменном процессе датчик может точно измерять давление в своём порту, но это давление запаздывает относительно камеры. Поэтому динамический тест выполняют в собранной конфигурации.

Для контуров регулирования анализируют не только паспортный response time, но и фазовый запас, частоту дискретизации, шум, saturation и восстановление после атмосферного давления. INFICON Stripe специально оптимизирован для быстрых циклов, а MKS DA03B — для цифрового EtherCAT-оборудования. CM1 с аналоговым выходом может быть быстрым элементом, но быстродействие всей системы подтверждают экспериментом.

12. Загрязнение и защита измерительной линии

Осаждение на мембране вызывает offset, изменение жёсткости, гистерезис и замедление отклика. Особенно опасны полимеризующиеся продукты плазмы, аэрозоли масла, соли, порошок и конденсируемые пары. Простая установка фильтра не всегда полезна: фильтр может сорбировать газ, создавать виртуальный объём и замедлять переходы.

Патенты MKS и других производителей показывают несколько направлений защиты: лабиринтные baffle, sump-объёмы, многоступенчатые экраны, равномерный подогрев и цифровое обнаружение дрейфа. Эти решения подтверждают общий инженерный вывод: стабильность в процессе определяется не только мембраной, но и путём загрязнения.

Для CM1 LeakLab подбирает порт камеры, ориентацию, температуру и защитный участок под конкретный процесс. Регламент может включать контроль нуля до/после серии, сравнение с резервным датчиком, тренд offset и замену загрязнённого элемента. Разборка сварной измерительной ячейки пользователем не рекомендуется: механическое воздействие и растворитель могут необратимо изменить мембрану.

13. Установка, питание и электромагнитная совместимость

Механическая установка должна исключать нагрузку от трубы и перегрев электроники. Фланцы KF центрируют через кольцо, CF требует контролируемой затяжки, VCR/VCO — чистых сопрягаемых поверхностей и правильного уплотнения. В OEM-каталоге CM1 обнаружено расхождение: таблица заказа и чертёж страницы 4 перечисляют не полностью одинаковые варианты VCR/VCO. Поэтому присоединение фиксируют полным кодом заказа и подтверждённым чертежом.

Питание $\pm 15 \text{ VDC} \pm 5 \%$ должно иметь достаточный ток для выбранного температурного исполнения. Нельзя подменять его однополярным 24 V без преобразователя и подтверждения. Сигнальная общая, общая питания и корпусная земля выполняют разные функции. Экран кабеля обычно соединяют с корпусом в соответствии со схемой системы, избегая паразитного тока по signal common.

Нагрузка входа должна быть выше 10 кОм. Для АЦП проверяют входной диапазон, разрешение, общую ошибку, синфазное напряжение и защиту от перенапряжения. При 16-битном АЦП номинальный квант 10 V/65536 не гарантирует сопоставимую точность: шум источника, reference, разводка и температурный дрейф могут доминировать.

14. Прогрев, обнуление и рабочая процедура

Для CM1 указан прогрев 2 часа при FS не ниже 1 Torr и 4 часа ниже 1 Torr. Это не формальность. За время прогрева стабилизируются корпус, мембрана, опорная полость, мост и выходная электроника. У нагретых исполнений нужно дождаться установившейся температуры, а у линии — равномерного теплового режима.

Обнуление проводят при давлении, достаточно малом относительно требуемой точности. Правило «насос включён, значит давление равно нулю» неверно. Если остаточное давление составляет заметную долю полезного диапазона, команда zero вычитает реальное давление и создаёт смещение всей шкалы. Для критической задачи остаточное давление контролируют другим методом или рассчитывают предел его влияния.

Рекомендуемая последовательность: проверить монтаж и кабель; включить питание; выдержать прогрев; откачать систему; дождаться стабилизации; зарегистрировать исходный zero; выполнить допустимую коррекцию; провести проверочную точку;

документировать температуру, ориентацию, дату и серийный номер. После атмосферного цикла или изменения положения повторяют проверку нуля.

15. Калибровка и бюджет неопределённости

ISO 3567:2026 описывает калибровку вакуумметров прямым сравнением с эталонным вакуумметром. ISO 27893:2026 посвящён оцениванию неопределённости результатов калибровки, ISO 20146:2019 — представлению характеристик, калибровки и неопределённости. Терминология сверяется с ISO 3529-3:2014. Для электрических мембранных датчиков полезны руководства PTB/DKD и документы NIST/NMIJ.

Калибровочная установка должна обеспечивать однородное и стабильное давление в зоне эталона и проверяемого датчика, низкую течь, малое газовыделение и контролируемую температуру. Точки задают по всему рабочему диапазону, обычно с сериями вверх и вниз. Регистрируют ноль, показание, эталон, температуру и время. Повторные циклы позволяют оценить повторяемость и гистерезис.

Типовой бюджет содержит неопределённость эталона, стабильность и градиент давления, повторяемость, разрешение, zero offset, температурные коэффициенты, ориентацию, считывание напряжения, поправку температурной транспирации и долговременный дрейф. Паспортные 0,25 % reading нельзя просто назвать «неопределённостью 0,25 %». Итог зависит от процедуры и коэффициента охвата.

LeakLab выполняет поставку, интеграцию, диагностику и сервисное сопровождение CM1, а также организует метрологическое сопровождение под задачу заказчика. Конкретный вид калибровки, трассируемость и применимость свидетельства согласуются до работ; настоящая публикация не заявляет непроверенную область аккредитации или право поверки.

16. Патентный ландшафт: что развивает отрасль

Исследование 16 патентных публикаций показывает шесть устойчивых направлений. Первое — изготовление металлической или керамической ячейки с низкими остаточными напряжениями. Второе — формирование стабильной опорной полости. Третье — равномерный нагрев и тепловая развязка электроники. Четвёртое — защита мембраны от

осаждения. Пятое — цифровой autonull, прогноз дрейфа и самодиагностика. Шестое — компенсация наклона и подавление механических колебаний.

US7706995B2 рассматривает коррекцию дрейфа с учётом истории процесса.

US6591687B1 и US7140085B2 относятся к керамической измерительной ячейке и её изготовлению. US7946178B2 — к нагреву ячейки. US6993973B2, US11287342B2 и другие публикации развивают baffle-защиту. US9719877B2 анализирует демпфирование колебаний мембраны, US9395386B2 и JP2010169665A — влияние наклона.

Патентная карта не является заключением ФТО. Действие притязаний зависит от юрисдикции, срока, правового статуса и точной конструкции. Для пользователя CM1 карта полезна как объяснение того, почему дорогой CDG — это не только мембрана и плата, а система управления нулём, теплом, загрязнением и динамикой.

17. Почему высокоточные CDG стоят дорого

Высокая стоимость формируется не редкостью самого принципа, а контролем множества малых эффектов. Для низкой FS требуется мембрана с воспроизводимой толщиной и напряжением, стабильный микрозазор, чистая опорная полость, герметичная сварка, низкогазовыделяющие материалы, малозумящий измерительный мост и индивидуальная калибровка. Для нагретой версии добавляются термостат, теплоизоляция, датчики температуры и проверка градиентов.

Производитель должен характеризовать поведение после атмосферных циклов, перегрузки, изменения ориентации и длительного прогрева. Серийная точность требует прослеживаемых эталонов и времени на калибровку каждой FS. Специализированные фланцы, чистая сборка, электронная компенсация и долгосрочное хранение калибровочных данных увеличивают себестоимость.

Цена референсного MKS AA06A или INFICON Cube отражает более жесткий метрологический уровень и внешнюю/интегрированную электронику. Цена высокотемпературного MKS 631F/DA03B или INFICON 200 °C отражает тепловой режим и процессную стойкость. CM1 занимает производственный сегмент, где важны проверяемые характеристики, выбор исполнения и локальная интеграция без переплаты за функцию, которая не нужна конкретной установке.

18. Типовые области применения CM1

В вакуумном напылении CDG задаёт воспроизводимое давление рабочего газа. В плазменной обработке он может участвовать в контуре регулирования с mass flow controller и throttle valve. В вакуумной сушке и дегазации он контролирует абсолютное давление независимо от состава парогазовой смеси, но требует оценки конденсации. В калибровочном стенде служит рабочим переносным датчиком, если его характеристики соотносятся с эталоном и бюджетом.

В испытательных установках CM1 полезен для регистрации давления в камере, ресивере или дозирующем объёме. В газовых системах — для контроля абсолютного давления в области выбранной FS. В научном эксперименте — для воспроизводимого задания давления разных газов без коэффициентов чувствительности, при условии учета температурной транспирации на низких давлениях.

Для агрессивных, загрязняющих или конденсируемых сред проводится отдельная оценка. Иногда правильным решением будет CM1 100 °C с обогреваемой линией, иногда — специализированный etch CDG, химический разделитель или другая схема. Универсального списка совместимых процессов по одному названию материала недостаточно.

19. Четыре контура проверки перед заменой MKS или INFICON

Механика: полная длина, диаметр корпуса, масса, фланец, положение уплотнения, доступ инструмента, ориентация и тепловой зазор. **Электрика:** питание и ток, разъём, распиновка, signal common, экран, выходной диапазон, нагрузка, setpoint и диагностика. **Метрология:** FS, ассигасу, разрешение, нулевой и шкальный коэффициенты, отклик, прогрев, ориентация и свидетельство калибровки. **Процесс:** материал, температура, загрязнение, конденсация, газовая линия, перегрузка и очистка.

Только после совпадения всех четырёх контуров конкретный CM1 можно рассматривать как замену конкретному part number. Даже визуально одинаковый DB15 может иметь другую распиновку. Даже одинаковый KF16 не гарантирует одинаковую высоту мембраны над камерой. Даже одинаковые 0–10 V не гарантируют одинаковую логику ошибки или clamp выше FS.

LeakLab может выполнить предпроектное сопоставление по паспорту установленного датчика, фотографии шильдика, схеме кабеля, чертежу узла и описанию процесса. Результатом должен быть согласованный код заказа CM1 и перечень необходимых изменений, а не общее обещание «полного аналога».

20. Практический чек-лист эксплуатации

1. Записать полный код заказа, FS, температуру и ориентацию.
 2. Проверить присоединение по актуальному чертежу, особенно VCR/VCO.
 3. Проверить питание $\pm 15\text{ V}$ и допустимый ток нагретой версии.
 4. Прозвонить кабель по распиновке конкретного прибора.
 5. Убедиться, что входная нагрузка выше 10 кОм .
 6. Исключить механическую нагрузку трубы на корпус.
 7. Обеспечить обогрев линии, если процесс склонен к конденсации.
 8. Выдержать 2 или 4 часа прогрева по FS.
 9. Обнулять только при доказанно достаточно низком давлении.
 10. Сохранять тренд нуля до и после производственной серии.
 11. После атмосферного цикла проверять восстановление показания.
 12. Не чистить мембрану механически и не заливать растворитель без процедуры изготовителя.
 13. Планировать периодическую калибровку по риску процесса и дрейфу.
 14. При замене сравнивать четыре контура совместимости.
-

21. Расчётный пример выбора и оценки результата

Пусть технологическое давление должно поддерживаться около $0,6\text{ Torr}$, допустимый рабочий коридор составляет $0,45\text{--}0,75\text{ Torr}$, а кратковременный переход не превышает $0,9\text{ Torr}$. Первым кандидатом является CM1 с FS 1 Torr . В точке $0,6\text{ Torr}$ идеальный выход равен 6 V . Для исполнения без подогрева с паспортной погрешностью $0,25\%$ от показания вклад паспортной ассигасы составляет $0,0015\text{ Torr}$, или приблизительно $0,20\text{ Па}$. Разрешение $0,001\%$ FS соответствует $0,00001\text{ Torr}$, или примерно $0,00133\text{ Па}$, но это только дискретность, а не итоговая погрешность.

Если нулевой offset после прогрева и обнуления повторяется в пределах $0,0002\text{ Torr}$, а температура окружающей среды изменяется на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, температурный вклад нуля

оценивают отдельно по коэффициенту для FS 1 Torr. Каталог указывает 0,015 % FS/°C для исполнения без подогрева: при 2 °C это 0,0003 Torr. Эти величины нельзя просто линейно объявить общей неопределённостью. Для независимых составляющих с подходящими распределениями используют корень суммы квадратов стандартных неопределённостей; коррелированные эффекты и систематическая поправка требуют иной обработки.

Если выбрать FS 10 Torr, рабочий сигнал будет около 0,6 V, а разрешение 0,001 % FS — 0,0001 Torr. Само разрешение ещё может быть приемлемым, но доля нулевого дрейфа и точность тракта АЦП относительно рабочего сигнала становятся менее выгодными. Если выбрать FS 0,25 Torr, рабочая точка выйдет за шкалу. Таким образом, 1 Torr является логичным начальным выбором, после чего проверяют атмосферные переходы, фактическую перегрузку, температуру и химическую совместимость.

Для нагретого датчика расчёт дополняют поправкой температурной транспирации. При 45 или 100 °C давление в измерительной ячейке и в холодной камере на низком давлении может различаться. Размер поправки нельзя назначить одним постоянным процентом: он зависит от газа, температуры, диаметра и длины соединения и режима течения. В калибровке конфигурацию делают воспроизводимой и документируют.

22. Типовые неисправности и диагностические признаки

Постоянный offset при глубоком вакууме может быть вызван недостаточным прогревом, реальным остаточным давлением, изменением ориентации, электрическим смещением, загрязнением или изменением опорной полости. Сначала проверяют процесс независимым датчиком и электрический ноль тракта; команда zero без диагностики способна скрыть развивающуюся проблему.

Медленное восстановление после атмосферы часто связано с сорбцией и десорбцией, загрязнённым входом, длинной трубкой или фильтром. Шум может идти от механической вибрации, плохого экрана, контура земли, нестабильного питания или регулятора давления. Нелинейность, заметная только в части шкалы, требует сравнения в нескольких точках и не диагностируется одним тестом zero/span.

Для нагретой версии дополнительными признаками являются длительный выход на режим, изменение потребляемого тока, локальный перегрев и несоответствие температуры корпуса. Не следует вскрывать прибор или воздействовать на мембрану.

Диагностика начинается с серийного номера, кода заказа, схемы подключения, журнала zero, условий процесса и сравнения с эталоном.

Приёмочный протокол после поставки включает визуальный контроль, проверку кода и фланца, сопротивления изоляции по допустимой процедуре, включение через ограниченный источник, контроль выходного сигнала, прогрев, нулевую точку, одну или несколько рабочих точек и фиксацию ориентации. Для замены существующего CDG добавляется проверка аварийной логики контроллера при обрыве, перегрузке и выходе за FS.

Инженерная инфографика CM1

23. Выводы

LeakLab CM1 — семейство мембранно-ёмкостных вакуумметров с металлической сварной ячейкой, отдельными полными шкалами, выходом 0–10 V и исполнениями без подогрева, 45 °C и 100 °C. Его сильные стороны — газонезависимый принцип, быстрый паспортный отклик, малый внутренний объём, широкий выбор FS и возможность подобрать температурный режим под процесс.

Технически грамотный результат достигается не максимальным числом в таблице, а согласованием полной шкалы, температуры, материала, монтажа, линии, нулевой процедуры и калибровки. Для сравнения с MKS и INFICON необходимо держать одинаковый температурный и метрологический класс. Высокотемпературные и референсные модели рассматриваются отдельно.

Лаборатория контроля герметичности LeakLab поставляет, интегрирует, диагностирует и обслуживает LeakLab CM1 в России. Для подбора направьте рабочий диапазон, газовую среду, температуру, присоединение, требуемую точность, интерфейс и данные существующего датчика. Специалисты LeakLab подготовят конфигурацию, схему включения и программу метрологического сопровождения.

Контакты: ООО «Лаборатория ВАКТРОН», leaklab.ru, mail@leaklab.ru, +7-812-715-00-17.

Частые вопросы

Можно ли называть CM1 товарным знаком MKS?

Нет. Baratron® — товарный знак MKS Instruments. CM1 является прибором того же функционального класса CDG, выпускаемым CBVAC по OEM-схеме для LeakLab.

Можно ли заменить MKS 627H на CM1 45 °C?

Возможность есть только после сравнения конкретных кодов: FS, точности, фланца, размеров, распиновки, питания, ориентации, материала и условий процесса. Названия температурного класса недостаточно.

Почему FS 0,02–1000 Torr не является диапазоном одного датчика?

Потому что чувствительность задаётся геометрией мембраны и электроникой конкретного исполнения. Каждая выбранная FS является отдельным прибором.

Когда нужен подогрев 100 °C?

Когда тепловая модель процесса показывает риск конденсации или требуется более стабильная температура ячейки. Подогрев линии и химическая совместимость проверяются отдельно.

Как часто калибровать CM1?

Интервал определяется риском процесса, требованиями системы качества, стабильностью нуля, частотой атмосферных циклов и результатами предыдущих калибровок. Универсальный срок без этих данных некорректен.

Можно ли считать разрешение 0,001 % FS точностью?

Нет. Разрешение — минимальный различимый шаг. Погрешность, повторяемость, ноль, температура и неопределённость калибровки оцениваются отдельно.

Основные источники

1. CBVAC. Vacuum Gauge Series Model Manual, revision 20.11.2025, pages 1–4.

2. CBVAC. CM1 Series Product Model Manual V4, pages 1–4.
3. MKS Instruments. [626D Absolute Pressure Transducers](#).
4. MKS Instruments. [627H Heated Capacitance Manometers](#).
5. MKS Instruments. [628H Heated Capacitance Manometers](#).
6. MKS Instruments. [E27H Etch Sensor](#).
7. MKS Instruments. [631F 150/200 °C](#).
8. MKS Instruments. [DA03B EtherCAT Manometer](#).
9. MKS Instruments. [AA06A Reference Sensor](#).
10. INFICON. [Capacitance Manometers](#).
11. INFICON. [Porter CDG020D](#), datasheet tiba44e1-c.
12. INFICON. [SKY CDG045D](#).
13. INFICON. [SKY CDG100D](#).
14. ISO 20146:2019. Vacuum technology — Vacuum gauges — Specifications, calibration and measurement uncertainties.
15. ISO 3567:2026. Vacuum gauges — Calibration by direct comparison with a reference gauge.
16. ISO 27893:2026. Vacuum technology — Vacuum gauges — Evaluation of uncertainties.
17. ISO 3529-3:2014. Vacuum technology — Vocabulary — Part 3.
18. NIST. Vacuum Comparison Standard; Pressure and Vacuum Measurements.
19. PTB/DKD. Calibration of electrical diaphragm gauges, DKD-R 6-2 Part 3.
20. Hyland R.W., Tilford C.R. Zero stability and calibration behavior of capacitance diaphragm gauges. DOI: 10.1116/1.573009.
21. Jousten K., Naef S. Stability of capacitance diaphragm gauges with ceramic membranes. DOI: 10.1116/1.3529023.
22. Daudé D. et al. Thermal transpiration correction and uncertainty. DOI: 10.1016/j.vacuum.2014.01.002.
23. Scherschligt J. et al. Bakeable capacitance diaphragm gauge stability. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110801.
24. Yoshida H. et al. Calibration and pressure dependence of CDG. DOI: 10.3131/jvsj2.53.686.
25. US7706995B2. Capacitance manometers and methods relating to auto-drift correction.
26. US6591687B1. Capacitive vacuum measuring cell.
27. US7946178B2. Vacuum measuring cell device having a heater.
28. US6993973B2. Contaminant deposition control baffle.
29. US9719877B2. Damping diaphragm vibration in capacitance diaphragm gauges.
30. US9395386B2. Electronic tilt compensation for diaphragm-based pressure sensors.

Полный проверяемый реестр из 72 записей, матрица утверждений и патентный ландшафт подготовлены в исследовательском пакете проекта.