

КАК ПРЕОДОЛЕТЬ БАРЬЕР 20000 PSI: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ НАСОСОВ ДЛЯ СВЭЖХ

С.Творк, Bal Seal Engineering
stwork@balseal.com

В статье рассмотрены проблемы конструкции насосов, используемых в жидкостной хроматографии для работы при высоком давлении. Авторы советуют конструкторам заглянуть "за пределы уплотнения" для того, чтобы достичь требуемого давления 20000 psi и более. Обсуждены условия дальнейшего развития вакуумной техники для жидкостной хроматографии, предложен целостный подход к ее конструированию. Даны конкретные рекомендации по улучшению конструктивных особенностей насосов, благодаря которым можно повысить срок их службы и преодолеть ограничения по достижению максимального давления.

Американский писатель и лауреат Пулитцеровской премии Эллен Глазго когда-то написала: "Единственная разница между могилой и разбитой колеей заключается в их размерах". Поскольку современные инженеры пытаются угнаться за растущими с молниеносной скоростью требованиями к увеличению давления у нового поколения ультравысокоэффективных жидкостных хроматографов (УВЭЖХ или СВЭЖХ), в этом старом, но до сих пор актуальном изречении они могут найти определенную опору.

За последние 30 лет значительно вырос спрос на насосы для жидкостной хроматографии (ЖХ), способные работать под высоким давлением. Повышенный спрос потребителей обусловлен тем, что при работе с высоким давлением можно добиться лучшей чувствительности и эффективности. В то же время производители, стремящиеся удовлетворить спрос потребителей с целью обеспечения более высокой конкурентоспособности своей продукции, требуют от инженеров создания передовых технологий для достижения высокого давления.

ПОТЕРЯ ТЕМПА

До сих пор все шло хорошо. Инженеры в сотрудничестве с поставщиками уплотнений были способны удовлетворить все новые требования, а растущее давление способствовало до середины 70-х годов 20 века продвижению новых технологий и повышению производительности ЖХ почти на 1900%. В результате разработано несчетное количество жизненно важных лекарств и диагностических методик.

Но в последние два или три года возникла новая проблема. Гонка за высокими давлениями превзошла способность промышленности решать комплексные задачи их достижения и удержания. Сегодня перед конструкторами насосов для ЖХ стоит намного более обширная задача: достижение надежных и бесперебойных рабочих процессов при давлении 20000 psi* и выше. Однако из-за ограниченных возможностей материалов и имеющихся конструкций насосов уже нельзя надеяться на то, что поставленные цели достижимы только с помощью уплотнений.

* Фунт-сила на кв. дюйм, 1 psi= 6894,76 Па.

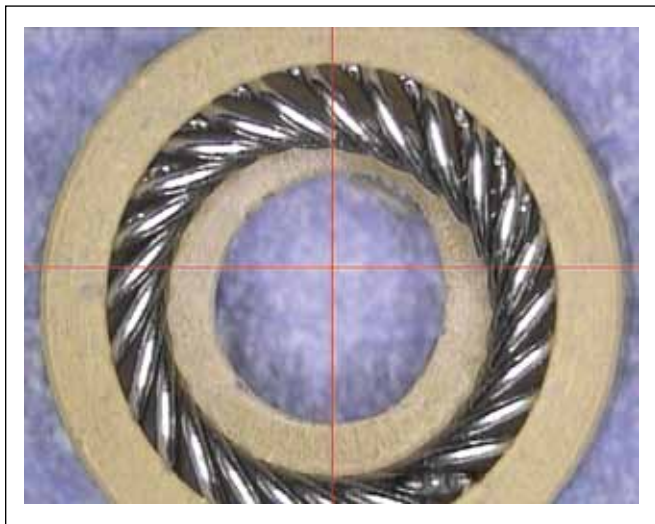


Рис.1. Боковая нагрузка – состояние, возникшее из-за неправильной линии направляющих плунжера, которое может вести к неравномерному износу уплотнения и даже к катастрофической поломке

Для преодоления барьера 20000 psi конструкторы прежде всего должны выйти за пределы ограничения "разбитой колеи" имеющихся конструкторских подходов и технологий уплотнения, а также принять целостностный подход к изменениям в конструкциях соединительных частей. Если этого не произойдет, они могут столкнуться с очень большими проблемами при обнаружении различия между "разбитой колеей" и "могилой", что в результате приведет к потере доли их продукции на рынке.

УВЕЛИЧЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Увеличение давления у насосов для ЖХ было эволюционным, но не революционным шагом. Несмотря на то, что научная отрасль жидкостной хроматографии возникла в начале 20 века, давление как параметр не было критическим показателем вплоть до 1970 года, когда профессор Чаба Хорват впервые ввел в употребление аббревиатуру HPLC в качестве "жидкостной хроматографии высокого давления" (ВЭЖХ). В 1982 году системы ВЭЖХ работали под давлением 3000 psi. Почти десятью годами позже они достигли отметки 8000 psi. Дальнейшая борьба за увеличение давления привела в 2004 году к использованию СВЭЖХ и устройств, способных генерировать давление до 15000 psi. Доработка этих конструкторских решений позволила достичь имеющегося рабочего потолка 17000–19000 psi. Теперь в постоянной борьбе за повышение разрешающей способности

и производительности наметился дальнейший рубеж – давление 20000 psi и выше.

Для более глубокого понимания, перед какой именно проблемой стоят сегодняшние конструкторы насосов ЖХ, необходимо оценить, что означает барьер 20 kpsi в других приложениях. В океанской среде для достижения такого давления вы должны погрузиться на глубину 8,6 миль (13,8 км).

Поршневые механизмы, используемые для создания силы у насоса для ЖХ, могут в таких системах также столкнуться с очень большими проблемами. Они могут быть весьма небольших размеров (в некоторых случаях их диаметр составляет менее 2 мм), но мощность аналогична мощности поршней в двигателях внутреннего сгорания. При обычной работе их ресурс – более 2 млн. циклов без разгерметизации.

ВЗГЛЯД "ЗА УПЛОТНЕНИЕ"

Повышение давления в жидкостной хроматографии никогда не было простым делом, новые требования всегда толкали технологии за пределы возможного.

Согласно мнению сотрудника компании Val Seal Engineering Майкла Биндера, инженера, специализирующегося на уплотнениях для аналитического оборудования, сегодня совершенно очевидно, что промышленность не может ожидать достижения своих целей, ориентируясь только на конструкцию уплотнений или на материалы.

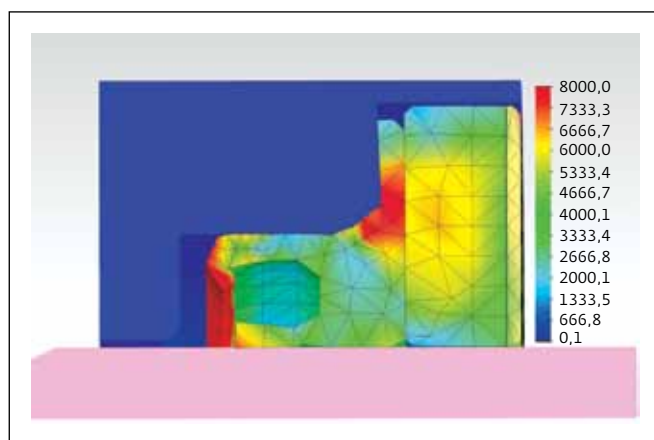


Рис.2. Контактные напряжения (отмечены красным цветом) в значительной степени влияют на функционирование уплотнения в приложениях для жидкостной хроматографии. Опытные производители уплотнений используют модели анализа видов неисправностей и их последствий, чтобы перед самым изготовлением прогнозировать возникающую нагрузку

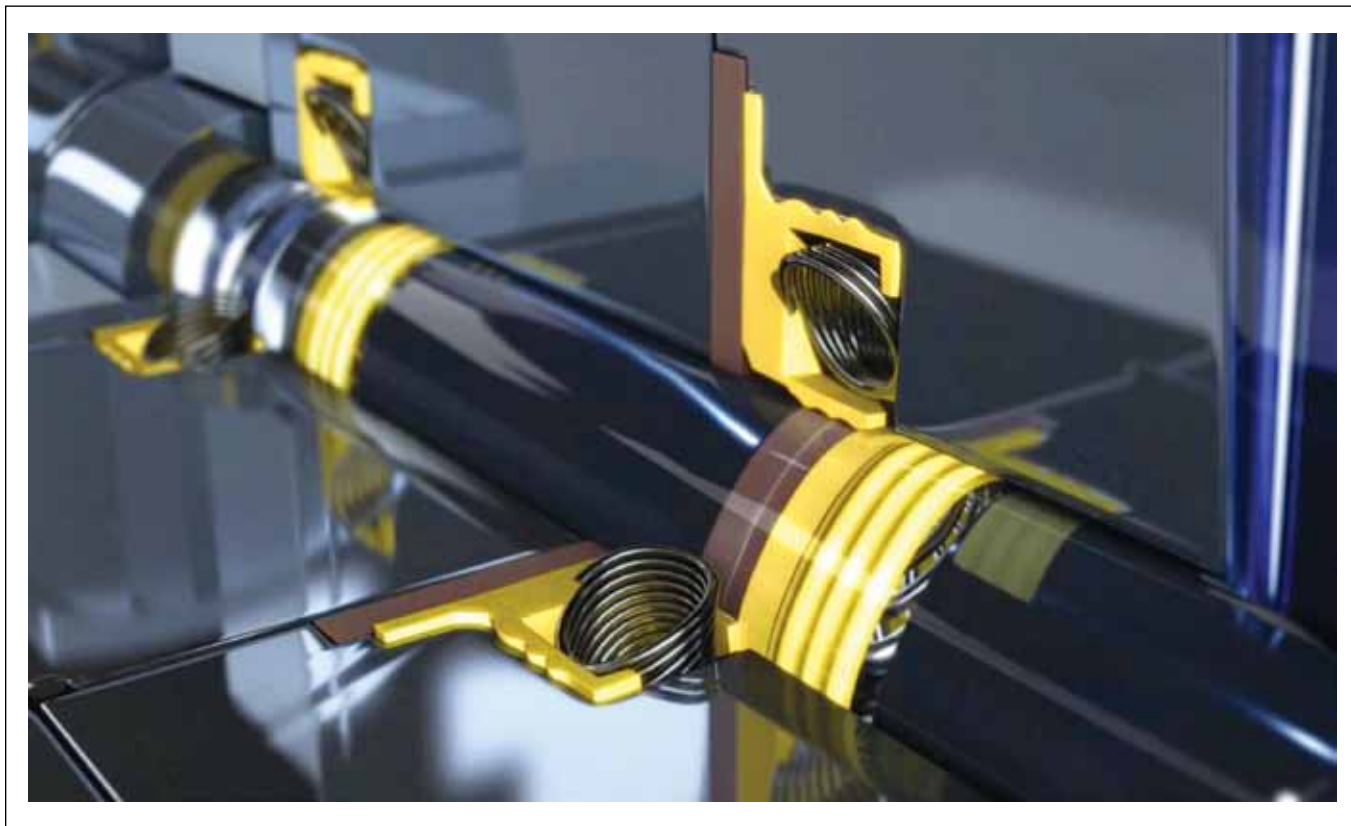


Рис.3. Современный насос для получения высокого давления. Для удовлетворения растущих требований к давлению конструкторы насосов ВЭЖХ и СВЭЖХ всегда полагались на уплотнения и резервные компоненты. Однако для соответствия новым требованиям может также понадобиться изменение конструкции устройства

Биндер, обладающий 23-летним опытом в области конструкций уплотнений для ЖХ, советует инженерам проанализировать те изменения, которые позволяют комбинировать насосы и уплотнения таким образом, чтобы преодолеть барьер в 20 kpsi. В ходе сотрудничества с некоторыми самыми крупными производителями приборов ВЭЖХ и СВЭЖХ он смог создать комплексный контрольный перечень позиций для конструкторов насосов для ЖХ. Следующая часть статьи суммирует содержание этого перечня, включая различные рекомендации.

ДИАМЕТР ВАЛА, МАТЕРИАЛ И ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ

Согласно Биндеру, при уплотнении жидкостей под ультравысоким давлением первичным требованием является соблюдение точных объемов расхода. Именно эта цель определяет диаметр плунжера, длину хода и скорость. "Это именно то пространство, где уплотнение и требования к эксплуатации насоса находятся в противоречии, - предупреждает он. - Существует очень тонкая грань между самым лучшим уплотне-

нием и реакциями плунжера при росте давления в цилиндре".

Одна из главных причин вскоре появляющейся негерметичности уплотнения - механическая боковая нагрузка на плунжер (рис.1). Это происходит тогда, когда плунжер при движении переносит свою нагрузку на внутреннюю поверхность уплотнения. Чтобы этого не происходило, Биндер рекомендует конструкцию, которая позволит накидной детали плунжера, связанной с системой привода, достичь оптимального равновесия (рис.2). Со временем боковая нагрузка преждевременно изнашивает материал, увеличивая тем самым внутренний диаметр уплотнения. Укорачивание хода не всегда ведет к уменьшению боковой нагрузки, если плунжер не уравновешен в рычажной системе правильным образом.

Биндер также указывает на то, что важную роль в сроке службы уплотнения, его работе и реакции на быстрые изменения давления играет размер плунжера. Малые плунжеры в случае систем с ультравысоким давлением находятся под меньшей нагрузкой, но уплотне-

ние должно быть также малым и способно противостоять соответствующему давлению. Это ведет к ограничению упругости в ходе всасывания (вакуум) и/или переходу к перемещению под давлением. Поддержание определенной степени упругости важно для достижения правильного контактного напряжения уплотнения (рис.3) на протяжении всего хода. В качестве материала для плунжера инженер по приложениям рекомендует сапфир, монокристаллический материал. "Это оптимальный выбор для контакта с термопластическим материалом уплотнения, поскольку он позволяет достигать лучшего качества поверхности и твердости, – продолжает Биндер. – Это очень важно, если вы попытаетесь соблюдать скорости утечки, определяемые в микролитрах или даже в нанолитрах". Он добавляет, что коэффициент адгезии мягкого термопласта и очень твердого сапфира сводит процесс утечки к минимуму.

Биндер также отмечает, что у некоторых насосов среднего давления для ЖХ в качестве материала появился керамический цирконий (TZP). Его твердость аналогична сапфиру, но многообразие вариантов его использования очень перспективно для ВЭЖХ. Он доступен во многих видах, причем каждый вид отличается классом, зернистостью, физической структурой и размером – свойствами, которые могут влиять на его стабильность.

Рекомендации для инженеров

Выбирайте чрезвычайно гладкую поверхность (шероховатость менее 1 Ra).

Задайте твердость выше 70 Rc.

Конструируйте плунжер с диаметром менее 2,1 мм (0,082 дюйма) из чистого сапфира.

МЕХАНИЗМ ПРИВОДА

В отношении конструкции механизма привода Биндер отмечает, что очень важно рассмотреть вопрос присоединения плунжера и коррективы им пульсации во время перекачивания. Скорость и длина перемещения изменяются в зависимости от боковой нагрузки на плунжер, что может привести к преждевременному износу уплотнения.

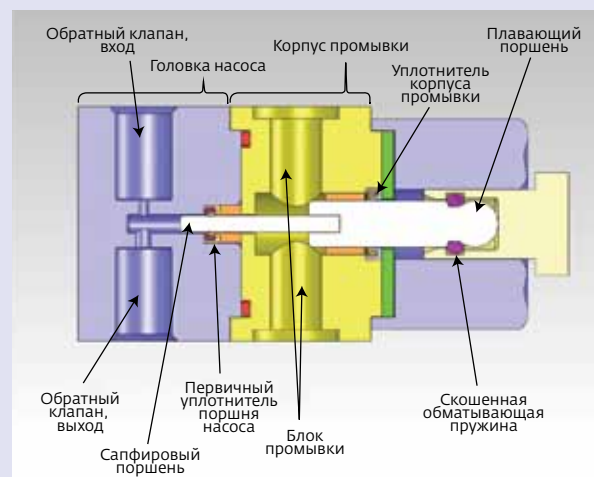
Синхронизация рычажной системы насоса также важна, поскольку победитель в битве между переменной скоростью и пульсацией будет определен механизмом привода. Синхронизация становится проблемой только в том случае,

Совершенный поршень?

Конструкторы насосов устройств ультравысокого давления для жидкостной хроматографии знают, что редко удастся найти решение для разных условий. Очень часто один конструкционный подход, который при специфических условиях выполняет свою функцию, при других условиях оказывается непродуктивным. Например, использование конструкции "плавающего поршня", соединяющего деталь плунжера с системой привода, обеспечивает центровку и защищает от боковой нагрузки, когда при движении плунжер неравномерно давит на внутренний диаметр уплотнения.

К сожалению, хотя плавающий поршень прекрасно выполняет свои функции при монтаже, обкатке и даже во время работы при низком давлении, при высоком давлении он обнаруживает слишком большое вертикальное и горизонтальное движение. В результате это может стать причиной возникновения боковой нагрузки, приводящей к преждевременной разгерметизации и неисправности.

До сих пор самый лучший подход к быстро растущим требованиям по высоким величинам давления для жидкостной хроматографии заключается в использовании жесткой системы привода с очень коротким ходом плунжера и малым диаметром вала. Данная комбинация помогает максимально продлить срок службы уплотнения и оптимизировать мощность насоса ЖХ.



если действие возвратной пружины плунжера недостаточно из-за трения уплотнения.

Рекомендации для инженеров

Сконструируйте систему привода, которой было бы достаточно для компенсации трения уплотнения.

Обеспечьте точное закрепление между накладной частью плунжера и подвеской плунжера – таким образом вы сделаете возможным плавающее положение (для центровки), а также высокую степень стойкости к движениям по вер-

тикали и горизонталы (см. врезку "Совершенный поршень?"). Включите в систему сильный возвратный механизм плунжера, способный корректировать трение уплотнения во время всасывающего хода.

ДИССИПАЦИЯ ТЕПЛА

Фрикционное тепло, возникающее под воздействием давления, может в значительной степени неблагоприятно повлиять на функционирование уплотнения. Поэтому Биндер рекомендует конструкторам насосов при проектировании не забывать о теплоотводе.

Он утверждает, что давление, возникающее при движении вперед или от уплотнения и прикасающейся фрикционной детали, может стать причиной контактного напряжения уплотнения (контактное давление), воздействующего на поверхность плунжера. Чрезвычайно сильные влияния могут возникнуть при движении вперед при ультравысоком давлении, когда контактное напряжение настолько высоко, что оно может преодолеть касательное напряжение материала уплотнения и привести к его износу или отслаиванию. Из-за этого материал можно иногда увидеть в ситечке (фильтр для нерастворимых частиц в жидкости), в трубопроводе или даже вокруг прикасающихся фрикционных деталей уплотнения.

Рекомендации для инженеров

Используйте активную систему ополаскивания.

Поддерживайте рабочее давление/скорость (PV) в пределах уплотнительного материала.

Задайте высокую степень гладкости поверхности плунжера (шероховатость менее 1 Ra).

ЛИНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПЛУНЖЕРА

Главная механическая проблема уплотнения под высоким давлением – боковая нагрузка на плунжер. Отклонение при движении плунжера от оси физически изменяет внутреннюю форму уплотнения и может вести к катастрофическим неисправностям.

Исторически насосы для ЖХ сконструированы с большой величиной соотношения размера плунжера к длине хода (например, 3:1). С изобретением ультразвуковых насосов эти плунжеры стали причиной возникновения преждевременных неисправностей уплотнений и их опор. Согласно Биндеру, надо использовать жесткую конструкцию рычажной системы и/или отношение раз-

мера плунжера к длине хода должно быть близко к соотношению 1:1, чтобы опора уплотнения могла поглощать часть остаточной боковой микронагрузки. Он рекомендует использовать жесткие рычажные системы, при этом замечая, что их важно удерживать концентрично по отношению к корпусу промывки и головке насоса.

Рекомендации для инженеров

Обеспечьте плотные и концентричные направляющие линии между корпусом промывки и головкой насоса (менее чем 0,05 мм).

Используйте упорное кольцо с высоким модулем упругости.

Используйте направляющее кольцо с высоким модулем упругости.

ВЯЗКОСТЬ СРЕДЫ

Большинство современных насосов сконструировано так, чтобы они могли работать со всеми типами сред-носителей – от соразвителей с низкой вязкостью, например, метанола, до сред-носителей с высокой степенью вязкости, например, буферных растворов из фосфорнокислого натрия, включая любые другие растворители. Конструкции насосов обычно не позволяют им работать одинаково эффективно с любой средой-носителем, потому что по большей части при тестировании они сталкиваются только с соразвителями.

Биндер утверждает, что уплотнение лучше работает в среде с низкой вязкостью и предупреждает конструкторов об ухудшении результатов при использовании среды с высокой вязкостью. Он замечает, что дегазирующие отверстия могут играть ключевую роль в эффективности уплотнения плунжеров очень малых диаметров. "Любой улавливаемый воздух, захваченный в пространстве уплотнительного отверстия и движущийся в направлении потока к калибровочной диафрагме, влияет на показатели давления насоса", – утверждает он.

Рекомендации для инженеров

Регулируйте контактное напряжение уплотнения при помощи среды с низкой вязкостью.

Ожидайте переменную величину контактного напряжения, если вы используете среду с высокой вязкостью.

ДЛИНА ХОДА

Как утверждает Биндер, длина хода, должна быть сведена к минимуму и должны быть обе-

спечены хорошие направляющие, чтобы плунжер был отцентрирован в корпусе промывки и канала головки насоса в ходе компрессионного и всасывающего хода. Это чрезвычайно важно во время компрессионного хода, когда плунжер больше всего подвержен боковой нагрузке упорного кольца уплотнения и уплотнения корпуса промывки.

При уменьшении длины хода с целью соблюдения требуемой величины расхода, согласно точке зрения Биндера, скорость плунжера должна увеличиться. Это, наоборот, увеличивает PV системы. Для обеспечения длительного срока службы уплотнения рекомендуется поддерживать PV системы в пределах, рекомендованных для материала уплотнения.

Рекомендации для инженеров

Используйте конструкции с соотношением диаметра плунжера к длине хода 1:1.

Обеспечьте наличие прочной опоры рычажной системы между накидной частью плунжера и приводом.

Выровняйте PV системы с предельным значением PV материала уплотнения.

ПЕРИФЕРИЙНЫЕ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ

Важно оценить влияние периферийного аппаратного оснащения – например, обратных клапанов, стоек, муфт и трубопроводов – во время тестирования системы с учетом функции уплотнения, поскольку эти составные части могут во время тестирования выдавать ложные положительные результаты. Обратные клапаны, не рассчитанные на правильное давление, слабые трубопроводные соединения, столбцы с более низкими параметрами и/или калибровочные диафрагмы давления – это только некоторые примеры потенциальных причин.

Биндер рекомендует тщательно контролировать требования к муфте и трубопроводу, поскольку причина возникновения негерметичности как раз скрывается именно в периферийных составных частях.

Рекомендации для инженеров

Попросите своего поставщика обеспечить заранее нарезанные трубы – не режьте их сами.

Для соединения муфт используйте правильные инструменты, затягивайте соединения с правильными моментами силы или поручите данные виды деятельности профессионалам.

Для тестирования характеристик давления используйте колонку с установленными параметрами и калибровочную диафрагму.

МОНТАЖ УПЛОТНЕНИЯ

Биндер утверждает, что путем настройки и соблюдения процесса монтажа уплотнения конструкторы могут избежать повреждения уплотнения и обеспечить правильное выравнивание уплотнения внутри насоса. Это очень важно потому, что начальные неисправности и негерметичности могут быть следствием неправильного монтажа/установки уплотнения в корпусе.

Рекомендации для инженеров

Пользуйтесь протестированными монтажными инструментами.

Проверьте положение и цельность уплотнения.

КРИТЕРИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

"Если вы оцените степень негерметичности и узнаете, когда возникнет потенциальная негерметичность, то вы поймете, каковы самые важные критерии неисправностей, кроме прочего, для головок насосов, обратных клапанов, муфт, датчика давления, корпуса промывки, датчиков и трубопровода", – утверждает Биндер.

"Трудно распознать причину, когда вы работаете с фирменным программным обеспечением, с несколькими видами условий (количество которых превышает 10) и с комбинациями аппаратного оснащения, – добавляет он. – Часто то, что сначала выглядело как причина неисправности уплотнения, в конце концов является ложным положительным или отрицательным результатом".

Рекомендации для инженеров

Определите несколько условий неисправности для каждого типа среды – равно как и для каждого потока или скорости.

Определите степень разгерметизации посредством программы при помощи датчиков изменений объема и падения давления, сведя к минимуму сбор данных вручную.

КРИТЕРИИ ТЕСТИРОВАНИЯ

Существует много способов оценки и корреляции критериев тестирования, имитирующих рабочие условия. Ускоренный тест для определения мощности насоса не обязательно должен представлять собой реальное рабочее использование, утверж-

дает Биндер, однако он может вести к такому поведению плунжера, которое сократит срок службы уплотнения посредством боковой нагрузки на уплотнения или повышенного нагревания при фрикционном трении. Требования к мощности также будут ассиметричными вследствие создания противодействия, имитирующего нормальную работу насоса во всей колонке.

Рекомендации для инженеров

Для противодействия используйте капиллярный трубопровод.

Избегайте использования игловых клапанов – они обычно отказывают или способствуют получению ложно положительного или отрицательного результата с величиной более 10 kpsi.

Проводите тест с колонкой, если это возможно, несмотря на то, что может быть трудно найти подходящую с номинальной величиной более 17,5 kpsi.

ВЫБОР ПОСТАВЩИКА УПЛОТНЕНИЙ

"Конструкторы новых насосов СВЭЖХ не могут не понимать, насколько важны уплотнения для общей работы насосов, – утверждает Биндер. – Они могут использовать в качестве уплотнения, например, обычные эластомерные уплотнительные кольца с простой геометрией. Термопластичные уплотнения представляют собой совершенно новый элемент, если речь идет об изгибе, контактных силах и физических свойствах материала". Исходя из сказанного выше, Биндер рекомендует конструкторам насосов найти хорошо информированного поставщика уплотнения, обладающего достаточным опытом работы с системами ВЭЖХ. Если они последуют его совету, то упростят процесс проектирования конструкции, исключив излишние проволочки.

Рекомендации для инженеров

Выберите партнера – поставщика уплотнения, предлагающего сильную техническую поддержку и поддержку в области сбыта.

Осведомитесь об опыте в отношении систем ВЭЖХ.

Требуйте возможности внутреннего тестирования для проверки продукта (рис.4).

СИЛЬНЫЕ ПАРТНЕРСТВА

С целью достижения рабочего давления 20000 psi, что до сих пор еще никому не удалось, несколько



Рис.4. Техник в тестирующей лаборатории компании Bal Seal Engineering с серией насосов высокого давления для жидкостной хроматографии

ведущих поставщиков устройств ЖХ ищут конструктивное решение насоса и рассматривают множество изменений, которые рекомендовал Биндер (и другие инженеры). Вместе с тем они призывают производителей уплотнений также принять участие в процессе разработки насосов в качестве активных "инновационных партнеров", как только они начнут искать решение проблем или включатся в консультации по отдельным проблемам.

В отношении принятия призывов достижения и превышения давления 20 kpsi, а также необходимости взаимного сотрудничества при разработке новых конструкций насосов – конструктор ведущего азиатского производителя устройств СВЭЖХ заметил следующее: "В отношении внедренных методик мы не сдвинулись с места, поэтому мы стали тесно сотрудничать с поставщиком уплотнений и вместе смотреть внутрь всей системы. После этого мы наконец начали продвигаться вперед".

