

# Проблематика влагостойкости РЭА. Усиление защиты доступными способами

Андрей Ласорла

Проблема влагостойкости и надёжности радиоэлектронной аппаратуры не решается быстро из-за разрозненности информации о современных разработках. При попадании воды в корпус электронных конструкций и даже при повышенной влажности воздуха, способствующей конденсации влаги, происходит ухудшение диэлектрических свойств изоляционных материалов, контактных площадок, соединений и печатных проводников – важных конструктивных элементов современной РЭА. Электронные устройства для бытового назначения по определению не предназначены для использования в средах с повышенной влажностью, температурой, а также в водной среде, и неминуемо приходят в негодность, если перед эксплуатацией не провести их специальной обработки. В статье дан анализ современных методов влаго- и аквазащиты РЭА, а также рассматриваются доступные варианты защиты радиоэлементов и устройств на примере производств КНР и Великобритании.

## Рисковые факторы влажности

Нормальной влажностью условно считается относительная влажность 60...75% при температуре +20...+25°C. От прямого воздействия влаги стационарная и транспортируемая РЭА бытового назначения, как правило, не защищена и не должна эксплуатироваться в таких условиях. Однако даже на такое оборудование регулярно при эксплуатации воздействуют пары влаги окружающего воздуха. Выпадение росы (конденсация на холодных поверхностях конструкции) вызывается понижением температуры – это естественное состояние во время эксплуатации и после отключения питания и последующего хранения РЭА без специальной консервации. К примеру, если в течение суток эксплуатации среднее значение влажности внутри РЭА составило 70%, то «точка росы» оказывается на 5°C ниже температуры внутри РЭА. Длительное воздействие высокой влажности вызывает коррозию металлических конструкций, деформацию элементов корпуса и даже гидролиз органических материалов. Продуктом гидролиза являются органические кислоты, разрушающие органические материалы и вызывающие интенсивную коррозию металлических несущих конструкций. Наличие во влажной атмосфере промышленных газов и пыли приводит к прогрессирующей коррозии. В результате создания

«благоприятных условий» для образования плесени воздействие влаги многократно усиливается.

Влагозащитные покрытия должны обеспечивать защиту РЭА, в том числе от случайного замыкания в открытых и в разъёмных соединениях проводников посторонними токопроводящими предметами, и надёжную работу электронных изделий в течение всего срока службы радиоэлектронной аппаратуры в жёстких условиях эксплуатации при воздействии таких факторов, как:

- влага;
- агрессивные химикаты, включая кислоту;
- соляной туман;
- температурные колебания (перепады температуры, приводящие к возникновению механических напряжений, низкое атмосферное давление);
- механические факторы (вибрации, удары, линейные ускорения, акустические шумы);
- микробиологическая коррозия (органические образования – грибки, бактерии).

Интенсивное нагревание переохлаждённой аппаратуры перед приведением её в рабочее состояние приводит к конденсации влаги на элементах конструкции [8]. Капли конденсата собираются в местах «ловушек влаги», поэтому и в этом случае нельзя исключать регулярное, а иногда и постоянное воздействие влаги на корпус и элементы РЭА. Существенно влияние влажности

на электрические соединения приводит к коррозии проводников, появлению «налётов» на разъёмных контактах, ухудшающих качество соединения. При загрязнении (пылью и влагой) отказывают и паяные соединения, окисная плёнка в гнездовых контактах соединителей приводит к отказам РЭА. Сложность также в том, что неисправность может быть «трудноопределимой», «плавающей», нестабильной, вести к необоснованному длительному времени ремонтно-восстановительных работ или к замене целиком дорогостоящих блоков РЭА. При поглощении влаги изменяют качественные параметры и слоистые диэлектрики, в результате на печатных платах образовывается водяная плёнка, а это способствует снижению сопротивления изоляции диэлектриков, появлению токов утечки, электрическим пробоям, механическим разрушениям вследствие изменения форм-фактора материала. Страдает также электрическая прочность, что особенно сказывается на работоспособности высоковольтных узлов. Влажность ускоряет разрушение лакокрасочных покрытий, нарушает герметизацию и целостность заливки элементов влагозащитными материалами. Всё это – реальная проблематика явления.

## Обоснование метода повышения влагостойкости

Волокнистые органические материалы, каким является дешёвый китайский пластик, склонны к быстрому старению, особенно при повышенных температурах и влажности. Старение происходит из-за термической деструкции целлюлозы, нарушения внутримолекулярных химических связей, что приводит к ухудшению эластичности, уменьшению механической прочности материалов, а также к ухудшению диэлектрических свойств. Целлюлозные материалы из-за большого количества макроскопических и субмикроскопических пор имеют большую поверхность соприкосновения с воздухом (106 см<sup>2</sup>/г), поглощают влагу из окружающего воздуха, в результате снижаются даже электрические

свойства изоляции. Пропитка целлюлозных материалов лаками или компаундами уменьшает поверхность пор и тем самым способствует уменьшению и замедлению окислительных процессов, а также затрудняет проникновение влаги внутрь корпуса устройств.

Образовавшаяся на поверхности корпуса плёнка лака или компаунда предохраняет изоляцию от разрушительного действия кислорода воздуха и значительно повышает её сопротивляемость воздействию влаги. Электрическая прочность и теплопроводность непропитанных электроизоляционных материалов невысока, так как в основном они определяются электрической прочностью и теплопроводностью воздуха, находящегося между волокнами электроизоляционных материалов. Пропитка лаками или компаундами обеспечивает заполнение этих воздушных промежутков и прослоек составом, имеющим высокую электрическую прочность, увеличивает электрическую прочность материала и всей конструкции в целом. В данном случае при работе электронного устройства не выделяется тепло, которое должно бы свободно отводиться, поэтому заполнение воздушных зазоров, кроме подвижных частей, пропитывающим составом, теплопроводность которого выше теплопроводности воздуха, создаёт условия для решения проблемы. Почему так происходит и зачем защищать электронные конструкции от влаги?

Абсолютная герметизация РЭА и, наоборот, технологическая открытость корпуса при постоянной продувке осушённым воздухом лишь крайние случаи из многообразия методов. Сегодня доступны наполненные эпоксидные или эпоксидно-акрилатные композиции, не содержащие растворителей и не нуждающиеся по технологии в последующем отверждении. Они используются для герметизации заливкой небольших по размерам печатных узлов в сборе. И хотя отработка рецептуры и режимов отверждения компаундов для конструкций индивидуальна, в результате мы получаем общий недостаток метода: неремонтопригодность электронных устройств [5].

### Практическая влагозащита: история и реальность

Нередко, когда говорят о влагозащите, подразумевают «лаковое покрытие». К примеру, нанесение полимер-

ного покрытия на печатную плату полвека назад было основным и универсальным методом влагозащиты. Затем по популярности и эффективности его превзошли двухкомпонентные системы эпоксидно-уретановых лаков типа УР-231, раствора алкидно-эпоксидной смолы Э-30, изготовленной на смеси тунгового и льняного масел, и отвердителя (70% раствора уретана ДГУ в циклогексаноне), Urethane-71, акрилового изоляционного Plastic-70, кремнийорганического Silisol-73 и др. Но использование влагозащитных покрытий на кремнийорганической основе жидкости 136-41 (ГКЖ-94), рекомендованной при лёгких и средних условиях эксплуатации, тоже анахронизм эпохи. Это объясняется низкой гидролитической устойчивостью полисилоксановых полимеров и сравнительно большим коэффициентом их влагопроницаемого эффекта. Силоксановое покрытие «универсал», в отличие от жидкости 136-41, – однокомпонентная система (раствор полимера в органическом растворителе), которая обладает удельным объёмным сопротивлением покрытия в 1,1015 Ом/см. Эпиламирующие составы содержат раствор фторсодержащих поверхностно-активных веществ в специально подобранных растворителях – так, фторсодержащее поверхностно-активное вещество адсорбируется поверхностью и образует тонкую плёнку. Плёнка обладает высокими гидрофобизирующими свойствами, химической и термической стабильностью. Подробнее об этом в [3].

Сегодня в распоряжении разработчиков средств влагозащиты современной электроники имеются более совершенные методы. Наносимый в жидком состоянии с помощью аэрозоля композит покрывает поверхность полнее, чем густой лак, сухой «плёночный» композит; это особенно полезно при высокой рельефности плат.

Что предпочтительнее с точки зрения влагостойкости РЭА в условиях небольших рисков и требований по влагозащите? Гидрофобизирующие жидкости, в том числе способные вытеснять воду. Для этой цели применяют FLUID 101/200 – распыляемое водоотталкивающее защитное покрытие – универсальный и экономичный метод по сравнению с заливкой изделий полимерными компаундами. Полимерное покрытие работает как диффузионный барьер на пути вла-

ги к поверхности печатной платы и её элементам, а эффективность барьера тем выше, чем ниже его диффузионная проницаемость. Кроме диффузионного барьера полимерное покрытие выполняет не менее важную функцию защиты элементов устройства от загрязнений и даже случайных замыканий проводников в условиях детонации, подвижности конструкции. При «полимеризационном наполнении» дефекты структуры пластикового корпуса и (или) в печатной плате заполняются жидкой композицией с условно высокими электроизоляционными свойствами. А если жидкость обладает высокими электроизоляционными и гидрофобными свойствами, как композиция, из которой производятся пластмассовые DIP корпуса микросхем, нет надобности её отверждать. Поэтому после обработки РЭА сразу готова к эксплуатации и не нуждается в термической обработке, подсушке. После рекомендованной обработки конструкция защищена от влаги: брызг, конденсата – в течение не менее полугода, вплоть до нового регламентного обслуживания. Особенности технологии и состав композиции исключают избыточную полимеризацию на поверхности корпуса и контактных площадках печатного монтажа. Кроме того, применение технологии повышает сопротивление изоляции в несколько раз. На рис. 1 представлен пример обработки корпуса светильников производства КНП аэрозолем FLUID 101/200.

Таким же методом, распылением аэрозоля в течение 2–3 минут непрерывно, обрабатывается печатная плата устройства внутри корпуса, контактные площадки элементов питания и корпус с тыльной стороны (со стороны отсека элементов питания). Как показал эксперимент, проведённый летом 2023 года, такой метод – удачное решение проблемы защиты поверхности простых электронных конструкций. Он позволяет не наносить дополнительные лаковые покрытия. После обработки устройство не отказало – и это при ежедневном нахождении в той же влажной среде. Средство также полезно для автовладельцев во время «смены сезонов» и в условиях повышенной влажности. Нанесение средства на клеммы автомобильной АКБ и другие контакты в силовых цепях обеспечивает надёжность работы силового и бортового оборудования автомобиля; проверено на практике морозной зимой.



Рис. 1. Иллюстрация обработки корпуса светильников китайского производства аэрозолем FLUID 101/200

Таблица 1. Описание степени защищённости РЭА от влаги и воды в разных критических условиях (IP)

Уровень IP	Защита от воды	Описание
X	–	Данные для определения степени защиты по критерию отсутствуют
0	–	Защита отсутствует
1	Вертикальные капли	Вертикально капающая вода не нарушит работу устройства
2	Вертикальные капли под углом до 15°	Вертикально капающая вода не нарушит работу устройства даже при его отклонении от исходного положения на угол до 15°
3	Падающие брызги	Защита от дождя и брызг: вертикальных или под углом до 60° к вертикали
4	Брызги	Защита от любых брызг
5	Струя воды	Защита от струй воды под давлением в 30 кПа на корпус с любого направления
6	Мощная струя воды	Защита от мощных струй воды под давлением в 100 кПа на корпус с любого направления
6K	Мощная струя воды высокого давления	Защита от мощных струй воды с любого направления под повышенным давлением в 1000 кПа
7	Погружение до 1 м не более 30 мин.	Только при кратковременном погружении попавшая вода не нарушает работу устройства
8	Погружение более 1 м	Устройство может работать в погружённом режиме в течение времени и на глубине, согласованной с производителем (как правило, до 3 м)
9	Струя воды высокой температуры	Стабильная работа в условиях высокотемпературной мойки водой высокого давления
9K	Мощная струя воды условно высокой температуры	Защита от брызг под высоким давлением и температурой: 14–16 литров в минуту с давлением 8–10 МПа на расстоянии 0,10–0,15 м с температурой 80°С

## Технологические возможности влагоизоляции

Широкое применение в качестве связующих и изолирующих материалов для современной электроники имеют специальные клеи, обладающие изоляционными свойствами и высокой адгезией к металлу. Они предназначены для склеивания изоляционных материалов между собой, для приклеивания их к металлу, а также для склеивания металлических поверхностей между собой. Современные требования в части влаго- и аквазащиты, предъявляемые к клеям, – быстрое высыхание при окружающей температуре, цементация между склеиваемыми поверхностями, высокие диэлектрические свойства, отсут-

ствие размягчения при последующем или возможном нагреве.

Назначение заливочных компаундов – заполнение промежутков между отдельными элементами, стыками корпусов электронных устройств для создания монолитной, влаго- и водонепроницаемой, механически и электрически прочной конструкции. Заливочные компаунды обладают вязкостью, высокими диэлектрическими свойствами (электрической прочностью и электрическим сопротивлением) в рабочих условиях; механической прочностью (к статическим и динамическим воздействиям); малой аква- и влагопоглощаемостью; термическим коэффициентом расширения (ТКР), близким к ТКР материала изолируемого изделия; малой усадкой при отвер-

ждении; хорошей адгезией к изолируемому материалу.

Назначение обмазочных компаундов – создание защитного электроизоляционного слоя, непроницаемого для воды, влаги и масла на поверхности корпусов электронных устройств. Обмазочные компаунды (изоляционные замазки, пасты) применяют для заполнения промежутков и неровностей между элементами конструкций в процессе изготовления для их цементации. Обмазочные компаунды обладают адгезией к наносимой поверхности; способностью к полному затвердеванию в толстом слое; высокой цементующей способностью и механической прочностью, ибо эффективно скрепляют отдельные элементы конструкции; электроизоляционными свойствами; стойкостью против действия влаги, воды и масла; имеют длительный ресурс эксплуатации, что важно для термореактивных компаундов холодного отверждения.

Повышают электроизоляционные характеристики независимо от исходного состояния корпуса, используя «полимеризационное наполнение». Дефекты структуры устраняют методом порозаполнения: с помощью полимеризационной композиции на основе бифункциональных мономеров, содержащих инициаторы полимеризации. Полимеризационное наполнение не исключает использование дополнительного лакового покрытия и (или) даже паяльной маски. Поскольку полимеризационное наполнение используют даже для микроминиатюризации печатного монтажа, доступны аэрозольные химические препараты для сервисного обслуживания электронного оборудования: растворители, лаки, смазки под разными торговыми марками, к примеру, Cramolin, Kontakt Chemie, Chemtronics и др. Но для получения влагозащитного полимерного покрытия не обязательно использовать лакокрасочные материалы. Уместен альтернативный метод вакуумной пиролитической полимеризации.

Первые сообщения об использовании полипараксилиленовых (париленовых) покрытий, формируемых таким образом, относятся к 80-м годам XX века. Метод использовали для нанесения покрытий на корпуса часов, в производстве военной и космической техники. Привлекательность метода обусловлена получением покры-

тия одинаковой толщины (от единиц Ангстрем до десятков мкм) одновременно на всей поверхности и даже в труднодоступных местах (щелях, глухих и сквозных отверстиях). Такое преимущество одновременно является и недостатком, усложняя защиту контактных поверхностей на печатных узлах и разъёмах.

### Характеристики влагозащищённости РЭА

В табл. 1 представлено описание степени защищённости РЭА от влаги и воды в разных критических условиях.

Уплотнение для обеспечения герметичности корпуса необходимо, начиная с пятого уровня в соответствии с табл. 1 [1].

### Четыре особенности (критерия) надёжности РЭА

В разных источниках, особенно в Интернете, предлагается много информации по теме расшифровки значений водозащищённости, указанной производителем в документации к конкретным электронным устройствам. В этой связи надо чётко понимать, что, во-первых, эти данные неточны и подчас противоречивы, а иногда и ангажированы коммерческими интересами продавцов (реализации), то есть некорректны. Во-вторых, необходимо понимать назначение электронного оборудования. Если это условный «ширпотреб», то он не рассчитан на погружение в воду, даже если в сопроводительной «документации» указано допустимое давление 10 бар. Если это специальное электронное оборудование для профессиональных целей (в том числе спорт, военная промышленность), то надёжность электронного устройства в разы выше. Но и цена оборудования условно кратна надёжности. В-третьих, есть существенная разница, где выпускалось электронное устройство, страна-производитель, на какой элементной базе (РЭА) и по какой технологии, а главное, с каким контролем (ISO) соблюдения таковой. Разработчики и специалисты осведомлены о том, что каждый элемент РЭА имеет собственные характеристики, в том числе наработки до отказа, рекомендуемые и критические условия среды эксплуатации, поэтому, как говорят во флоте, «скорость эскадры определяет самый тихоходный корабль»: в данном случае выражение верно и в отношении надёжности РЭА.



Рис. 2. Многофункциональные смарт-часы Forerunner 965 (2023 г.): фронтальный и тыловой виды

Если производство, равно как и соблюдение технологий, под контролем Великобритании, даже при том, что завод в Сингапуре, то документация более-менее можно верить, и такое устройство намного надёжнее «ширпотреба» из КНР, где большинство сведений в описании и «паспорте изделия» надо «делить на 10». Поясним на примере. Значимый и популярный показатель влагозащиты в носимых устройствах РЭА – сила давления. В качестве единиц используются атмосферы (АТМ). Когда принято считать, что значение «1 атмосфера» условно обеспечивает защиту от воды на глубине погружения 10 метров, электронное устройство с влагозащитой 10 АТМ может выдерживать погружение в воду на глубину до 100 метров. Однако на практике заявленный показатель не означает допустимую глубину погружения. Особо важно, что обозначение аква- и влагоустойчивости не является панацеей от рисков отказов электронного оборудования, поэтому надо относиться к этим сведениям условно, и если, к примеру, в документации на популярные многофункциональные смарт-часы Forerunner 965 от Garmin (рис. 2) указана возможность погружения в 5 АТМ, это значит, что плавать в них можно, но погружаться даже на 5 метров нежелательно (до 5 допустимо).

Устройство класса HUAWEI WATCH Ultimate кроме водозащищённости оснащено качественным корпусом, керамическим безелем и сапфировым стеклом. При выборе надёжной РЭА желательно обращать внимание на показатели водоустойчивости. Чем они выше, тем больше вероятность, что электронное устройство переживёт экстремальные ситуации из-за падения в воду, воздействия сильного ливня или забывчивости пользователя о снятии с себя часов перед погружением тела в бассейн или иную акваторию на отдыхе. Даже такой гаджет сегодня оценива-

ется в \$600, и приобрести его в России без накрутки посредников затруднительно. А профессионалам, постоянно занимающимся водным спортом, подойдут ещё более серьёзные модели с защитой 10 АТМ и выше с соответствующим софтом и датчиками, определяющими глубину, температуру воды, скорость перемещения и автоматическим расчётом NDL (максимально возможного времени на глубине до возникновения декомпрессии).

### Как работают поставки качественного оборудования сегодня

Сегодня сервисы заказа РЭА через Интернет стали как никогда доступными, и весьма популярно китайское направление. Не рекламируя без необходимости эти каналы (их несколько, причём с филиалами, складами и офисами в Москве), уместно отметить, что получить электронное оборудование обычного потребительского уровня можно даже с бесплатной доставкой или, по крайней мере, с существенной на неё скидкой. Например, если вы новый пользователь, то первые 3–4 покупки вам могут обойтись заметно дешевле, чем последующие. Чтобы сэкономить, достаточно стать «новым пользователем», то есть снова зарегистрироваться с другим номером сотового телефона. Затем номер телефона из базы, как и сам аккаунт, можно удалять, и через 30 дней (по условиям большинства сервисов) снова применять в новом аккаунте. Эта информация для тех, кто экономит свои средства, в том числе в сервисе доставки. Так можно заказывать из любого уголка России всё: от книг до небольшой мебели для самостоятельной сборки. А далее полезные сведения для тех, кто желает получить качественную РЭА не из КНР в условиях «санкционного давления».

Сегодня, когда привычная и десятилетиями действующая логистическая

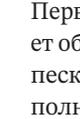
ATM	METERS						
3	30	✓	✗	✗	✗	✗	✗
5	50	✓	✗	✗	✗	✗	✗
10	100	✓	✓	✓	✓	✓	✗
30	300	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Рис. 3. Условная таблица рекомендуемых эксплуатационных действий для РЭА бытового назначения при соответствующем обозначении влагозащиты

цепочка нарушена, особенно ценны личные или взаимовыгодные коммерческие отношения. Большинство уважающих себя фирм, в том числе в нашей области поставок РЭА зарубежного производства, адаптировались в течение 2022 года к новым вызовам времени и поступают так. А кто не поступает – анализируйте, пожалуйста, этот никому не навязываемый опыт. На почтовый адрес гражданина ЕС, согласно его заказу, из Великобритании поставляется оборудование РЭА. Как правило, с предварительной оплатой заказа, но не обязательно, ибо ID-карта европейца уже является его гарантией платежеспособности. Заказать можно, разумеется, всё: от таблеток для повышения работоспособности до кроссовок и электроники. Получив заказ, европейец или россиянин, проживающий в ЕС, перемещает его личным или иным транспортом на территорию России, где по договоренности фирма-заказчик с удовольствием принимает товар, оплачивает комиссионные услуги и издержки, выгодные всем в логистической цепочке, и затем... заменяет упаковку, чтобы соответствовать российским требованиям, вкладывая также инструкцию на русском языке. Цены обычно местные предприниматели ставят европейские в соответствии с курсом СКВ, прибавляя около 36% «интереса»: такова типичная практика. Именно поэтому лучше иметь свой канал поставки: международные личные связи стали ещё более ценными в наше турбулентное время.

### Международные стандарты защищённости IP

Наиболее распространённые рейтинги защиты определяет Международная электротехническая комиссия (IEC). Чаще всего водонепроницаемость выражает показатель ATM (сила давления в атмосферах) или код IP. Поми-

мо приведённых в пример популярных рейтингов, существуют ещё два стандарта Международной организации по стандартизации (ISO). Первый, ISO 22810, подходит для обычных моделей и гарантирует влагозащиту на гарантийный срок службы. А второй, ISO 6425, используется в профессиональных устройствах для дайвинга, рассчитанных на погружение на глубину свыше 100 метров.

Классы водонепроницаемости по силе давления разделяют на несколько видов:

- 1 ATM (10 метров): РЭА выдерживает попадание брызг, капель дождя и обильное выделение пота человека;
- 3 ATM (30 метров): РЭА не боятся прогулок под дождём и мытья рук;
- 5 ATM (50 метров): РЭА защищено от рисков повреждения при плавании (занятия водными видами спорта) и в проточной воде (в душе);
- 10 ATM (100 метров): кроме сказанного выше допустимо погружение на глубину 15–20 м;
- 20 ATM (200 метров): РЭА специализированного назначения подходит для погружения на глубину до 50 метров и постоянного нахождения в воде не дольше двух часов;
- 30 ATM и выше (от 300 метров): РЭА специализированного назначения, в том числе для глубоководного погружения с аквалангом.

В характеристиках некоторых умных гаджетов указывают соответствие нескольким рейтингам. К примеру, может быть указана водонепроницаемость 10 ATM по стандарту ISO 22810:2010. Это значит, что в часах можно плавать, заниматься водными видами спорта и нырять на мелководье.

IP – международный стандарт, определяющий степень устойчивости электронного устройства к внешним воздействиям. Типичный вид маркировки

таков: IPXX, где XX – уровень защиты. Первая цифра от 0 до 6 – свидетельствует об уровне защиты от проникновения песка и пыли, где 0 – нет защиты, а 6 – полная пыленепроницаемость. Со степенью защиты в части пыленепроницаемости можно ознакомиться в том числе в [4]. Вторая цифра в рейтинге IP – степень влагозащищённости РЭА по шкале от 0 до 9, где 0 – нет защиты от воды, а 9 – устройство выдерживает погружение и мощные потоки даже условно горячей воды.

Всё чаще производители РЭА используют показатель IP в сочетании с данными о силе давления; так удобно сразу информативно заявить о защите модели от проникновения песка и пыли. К примеру, бытовое устройство со степенью защиты IP6X предполагает полную пыленепроницаемость и практически лишено рисков, как в пустыне Каракумы, так и на ближайшем пляже.

На рис. 3 представлена условная таблица рекомендуемых эксплуатационных действий для РЭА бытового назначения при соответствующем обозначении влагозащиты.

Тем не менее большинство производителей используют общепринятые обозначения водоустойчивости РЭА: давление, при котором корпус изделия не подвержен деформации, и глубина, на которую возможно погружение ходиков. Поэтому водостойкость измеряется в барах, метрах или футах. К примеру, обозначение «wr 30» или «water resist 30 m» предполагает, что РЭА может исправно работать на глубине 30 метров или при давлении 3 бар.

### Действенные методы влаго- и аквазащиты

Один из самых популярных методов производства корпуса – многокомпонентное литьё. Технология позволяет комбинировать несколько термопластов внутри одной литьевой формы. Это выгодно и оправдано по двум причинам: не требуется сборка, ибо компоненты корпуса «спекаются» прямо в пресс-форме, а это, соответственно, упрощает и удешевляет технологию, делая в итоге электронное устройство конкурентным на рынке условных аналогов. Так, при сборке корпуса для крепежа используют металлические резьбовые вставки или специальные винты по пластмассе. При выборе важно оптимальное соотношение: материал должен быть достаточно эластичным для нажатия



Рис. 4. Пример создания пластикового корпуса посредством ТПА

кнопки и герметизации, но иметь достаточную твёрдость для сопротивления истиранию от тактильного воздействия извне. В реальной технологии производства и оттиска пресс-формы учитывают, что подложка успеет остыть и измениться в размерах из-за усадки материала. Пока деталь не успевает остыть, достигается хорошая адгезия материала. При производстве таких корпусов используются специальные термопластавтоматы (ТПА) с двумя резервуарами и двумя шнеками для разных материалов. Но при впрыске второго компонента подложка может смещаться, поэтому её нужно зафиксировать по габаритам детали или предусмотреть дополнительные элементы: отверстия для фиксации на штифтах во второй форме [1].

На рис. 4 представлен вид создания пластикового корпуса для РЭА посредством ТПА.

На рис. 5 представлен горизонтальный станок ТПА для многокомпонентного литья полимеров тайваньской компании Jonwai по производству двухкомпонентного корпуса из гибкого пластика для РЭА модели JM-180TCSi5H.

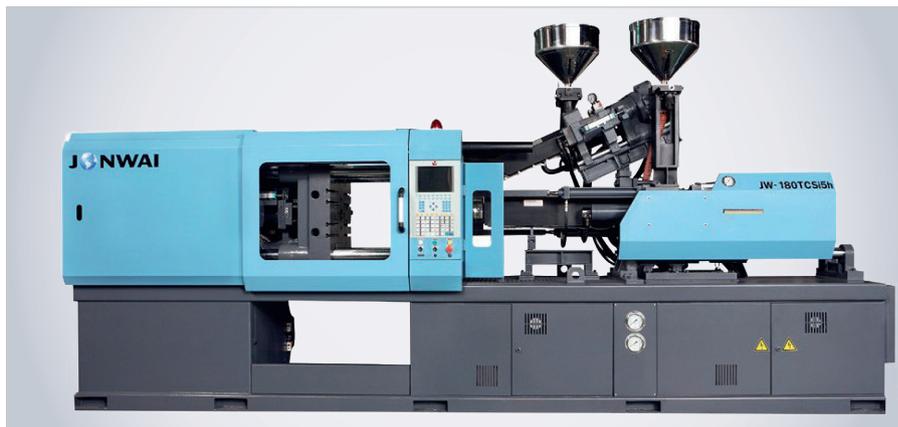


Рис. 5. Станок по производству двухкомпонентного корпуса из гибкого пластика для РЭА-модели JM-180TCSi5H

В процессе литья автомат впрыскивает расплав одного материала, поворачивает пресс-форму за счёт специального модуля и добавляет в неё расплав второго материала.

Поворотная форма для многокомпонентного литья создаётся по технологии, позволяющей отказаться от прокладки уплотнителя и отлить его прямо в корпусе в качестве второго материала. Так получается герметичный пластмассовый корпус с хорошей адгезией, т.е. сцеплением материалов. Схематический вид проекта моделирования корпуса представлен на рис. 6.

Затем производится заливка уплотнителя методом многокомпонентного литья: заливка детали по контуру эластичным материалом. Вид результата операции представлен на рис. 7.

А ещё многокомпонентное литье позволяет реализовать любые фантазии дизайнера с разными материалами, цветами и фактурой. Конечно, при этом усложняется и сама разработка пресс-формы для корпуса: инженерам

и технологам нужно учитывать узлы впрыска, а производителю – настраивать систему управления. Пластик поддаётся формовке, что иллюстрирует рис. 8 с пояснениями: «1» – форма общая, «2» – формовка в области места скрепления корпуса.

### Практические примеры влаго- и аквазащищённого оборудования

Полезный функционал имеется в разрешённой к свободной продаже «экшн-камере». Много лет любители экстремального туризма пользуются такими электронными устройствами для контроля подводной акватории. Внешний вид камеры представлен на рис. 9.

Такие устройства выпускаются в КНР, номинально имеют разные названия (фирм-производителей), но обладают сопоставимыми характеристиками. Подобное электронное устройство герметично по степени защиты IP68, а корпус снабжён противоударной защитой. Это даёт возможность виде-

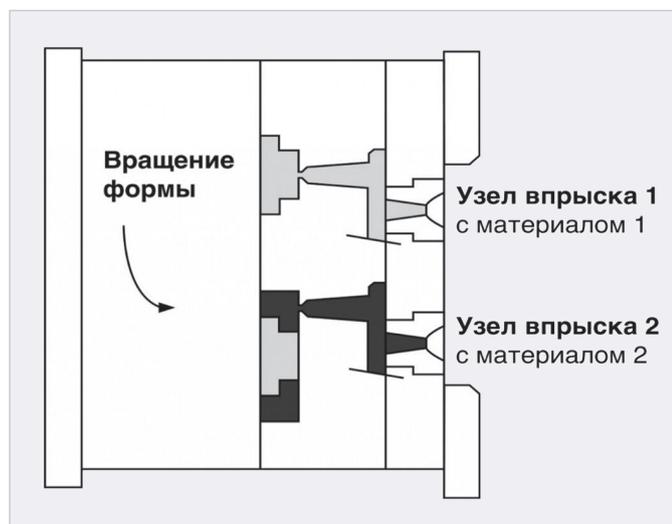


Рис. 6. Схематический вид проекта моделирования корпуса

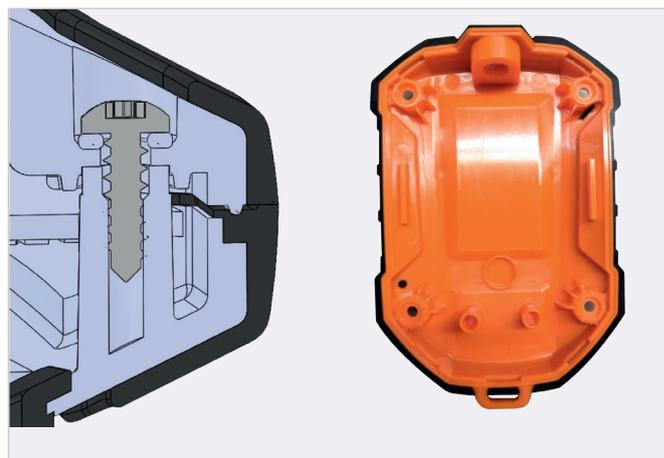


Рис. 7. Результат заливки уплотнителя методом многокомпонентного литья – заливка детали по контуру эластичным материалом

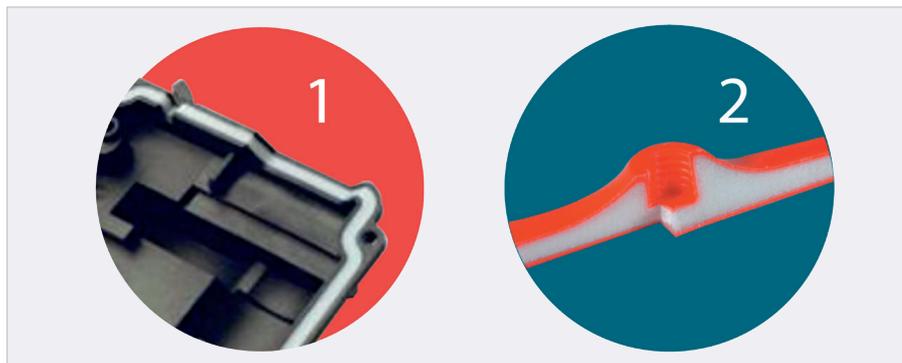


Рис. 8. Иллюстрация формы в месте скрепления (фиксации) частей корпуса



Рис. 10. Иллюстрация видеосъемки мест скопления рыбы

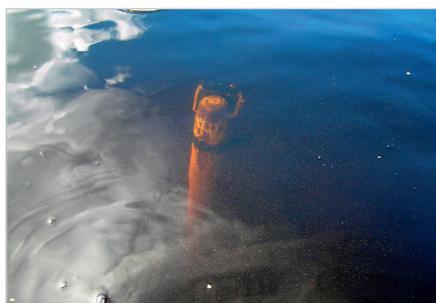


Рис. 11. Место и особенности установки видеокамеры для подводного наблюдения акватории

осъемки под водой. Максимальная глубина, при которой производитель гарантирует исправность электронного устройства, составляет 6 метров. Это вполне допустимо для применения в условиях любительской рыбалки, а также охоты в дождливую погоду.

Цифровая рация с MP3-плеером для сёрфинга, кайтсёрфинга и виндсёрфинга с MP3-плеером для водных видов спорта нуждается в обеспечении высокой защиты от внешних воздействий по стандарту от IP67 и выше. Для реализации этих требований в корпусе электронного устройства требуются минимальный вес и габариты, простое кнопочное управление и, возможно, лишь одна аварийная кнопка. Для этого применяют эластичный материал для герметичных кнопок и бамперов на фронтальной и боковых сторонах, а для герметизации периметра и динамической головки используют уплотни-

тели. Корпус водозащищённой радиостанции представлен на рис. 4.

Вкратце особенности корпуса устройства и технологии защиты от влаги и воды таковы. Используется специальный разъём с защитой IP67. Уплотнитель разъёма заходит с натягом в отверстие корпуса. Заливка фронтальных кнопок эластичным материалом проходит через клеёный срез эластичного шнура, как показано в позиции «1» на рис. 8. Прозрачная подложка заливается эластичным материалом. Этот же эластичный материал используется для герметичных кнопок, достижения ударопрочности и в качестве уплотнения между деталями.

Инженерная задача была реализована на практике так: стекло из материала ПММА используется в качестве закладной детали, а сверху заливается пластик (РС). Полученная пластиковая деталь со стеклом обливается резиной (TPU), которая также формирует эластичные кнопки, служит защитным бампером и обеспечивает герметичность корпуса при сборке с нижней деталью, которая производится по аналогии (тоже с закладными деталями, но уже без «стекла»). Уплотнители также используются для разборных корпусов, подлежащих ремонту или содержащих сменные элементы питания. Для неразборных герметичных систем применяются иные адаптированные технологии, такие как сварка, склейка и др. Примеры уплотнителей следует привести отдельно. Варианты могут быть такими:

- прямоугольное резиновое уплотнение закладывается в канавку;
- круглое резиновое уплотнение закладывается в канавку;
- уплотнение слоем с натягом;
- уплотнение с клейким слоем.

Если путь прокладки уплотнителя длинный, то используют шнур. Концы шнура обрезают под острым углом, что-



Рис. 9. Камера для видеосъемки под водой

бы увеличить площадь среза, а затем склеивают эластичным клеем [1].

Автор испытал устройство (рис. 9) осенью 2022 года в Ленинградской области и ранее в Финляндии на озёрах и реках. Эффективность видеокамеры можно подтвердить при разведке мест скопления рыбы (рис. 10, рис. 11).

На рис. 10 показан скан с видеоизображения, полученного видеокамерой, установленной на глубине 1,8 метра на р. Вуоксе (Ленинградская область, Приозерский район) в 22 часа в один из летних дней. Дата автоматически фиксируется также и на фото.

Камера устанавливается под водой в месте необходимой рекогносцировки, закреплённая на шесте или ином подходящем предмете (рис. 11), или опускается под воду с лодки на шесте или верёвке.

В последнем случае пользователь может столкнуться с «ненужным» вращением устройства (вокруг оси), что затрудняет управление подводной съёмкой. Поскольку верёвка, трос, канат не являются устойчивыми «штативами», намного лучше закреплять устройство с помощью жёсткой фиксации: поставляемый в комплекте ремень крепко притягивает камеру к шесту (рис. 9, рис. 11), затем заточенный с одной стороны под конус шест опускают в воду на необходимую глубину и с усилием вонзают в дно водоёма.

Другая особенность экшн-камеры в том, что при выборе пользователем соответствующего режима устройство передаёт изображение в режиме онлайн: то, что «видит», то и передаёт по каналу Wi-Fi. Таким образом, на смартфон или планшетный компьютер с поддержкой Wi-Fi на расстоянии до 50 метров устройство передаёт изображение в реальном времени.

Предварительно включают камеру и оборудование (ПК, планшет, смартфон

с функцией Wi-Fi) для просмотра картинка в реальном времени. После установки камеры необходимо подождать до получаса, и затем в спокойной для рыбы обстановке «мониторить» картинку под водой. При необходимости в месте размещения камеры можно сделать прикорм для рыбы: несколько заранее заготовленных «шариков» глины вперемешку с хлебом и бойлы с анисовым маслом. Если крупная рыба реагирует на прикорм, пользователь это увидит и примет решение о рыбалке в данной местности. Качество картинки, которую экшн-камера, установленная под водой, даёт оператору-рыболову, вполне удовлетворительное (рис. 10).

С помощью смартфона или планшетного компьютера можно управлять видео- и фотосъёмкой установленной под водой камеры дистанционно и без проводов. Изменить режим съёмки с видео на серию фотокадров, включить/выключить ИК-подсветку для съёмки в темноте, установить режим активации съёмки только при появлении в зоне объектива движущегося объекта – в данном случае рыб. Камера оснащена встроенным аккумулятором, время работы 60 минут. Затем устройство подзаряжают на суше или устанавливают сменный аккумулятор. Для тех, кто не имеет возможности контролировать «подводную картинку» в режиме реального времени, не имеет смартфона или планшетного компьютера, рекомендуется время от времени (1 раз в 20 минут) извлекать камеру, просматривать записанное изображение на встроенном дисплее или (если нужна масштабная картинка) переустанавливать карту памяти в смартфон или ноутбук и так просматривать запись. На практике 20 минут для рекогносцировки «подводного царства» вполне достаточно.

Это водозащищённый инструмент для разведки под водой для определения эффективности рыбалки в конкретном месте. На зимней рыбалке 2023 года при температуре воды 0°C камера подтвердила работоспособность, однако заряда аккумулятора хватало примерно на 30 минут (летом в 2 раза больше). Наиболее хорошие результаты подводной разведки получаются в местах с небольшим течением, в заводях рек, а также на озерах и прудах. Несмотря на компактный размер, цифровой портативный видеорекордер является универ-



Рис. 12. Внешний вид устройства подсветки с ПДУ производства КНР

сальным (в части возможных задач) и надёжным помощником. Управление записью осуществляется одной кнопкой, её нажатие приводит к немедленному началу или окончанию записи. Это выгодно отличает устройство от большинства аналогов.

### Выбор других примеров

Устройство, представленное в начале статьи на рис. 1, характеризуется подсветкой на светодиодах с автономным питанием в виде 3 последовательно соединённых батарей или аккумуляторов типа ААА с суммарным напряжением 4,5 или 3,6 В. На рис. 12 представлено устройство аналогичного предназначения, которое включается как непосредственно нажатием на корпус, так и с помощью ПДУ (рис. 12 – справа), с предусмотренным режимом выключения с помощью таймера.

В устройстве применяется светодиодная матрица, в которой на печатной подложке последовательно соединены светодиоды в SMD-исполнении. При таком подключении и напряжении питания нет необходимости ограничивать ток в цепи. Конструктивно устройство выполнено в разборном пластиковом корпусе «плоской» формы толщиной 20 мм. Задняя крышка корпуса открывает доступ к элементам питания, закручивается по часовой стрелке и фиксируется в трёх местах. На ней же предусмотрен элемент крепления к поверхности посредством ленты с двусторонним липким слоем; это крепление на липкой основе довольно надёжно благодаря относительно малому весу «подсветки», однако предназначено для одноразового использования. Такое устройство автором выбрано для эксперимента «влагостойкости» в связи с подходящими условиями эксплуатации: лучше освещает пространство, световой поток не сконцентрированный, как в фонаре, а рассеянный, что удобно

именно для подсветки в помещениях с недостаточной освещённостью. Также это может быть полезно при полном отсутствии света, например, при авариях в осветительной сети, для обеспечения бытовых задач. Кроме прямого назначения подсветка весьма удобна как дешёвый, мобильный и автономный источник света. Отличительная особенность устройства в том, как организовано его включение/выключение: путём нажатия на корпус, защитную пластиковую пластину в месте расположения светодиодов. Защитная прозрачная пластина по одной стороне соприкасается с выключателем без фиксации, установленном на небольшой печатной плате. Выключатель соединён с электронным триггером. Таким образом, каждое последующее нажатие переводит устройство в «обратный» режим: от включения к выключению. Разумеется, моделей разных много, и включение подобных устройств может быть организовано и другим способом, без триггера.

Всё было бы хорошо, если бы не условия применения в относительно влажной среде, для которых устройство не предназначено. Не только погружение в воду лишает работоспособности, но и брызги воды, попадающие в негерметизированный корпус, высокая температура сауны и (или) парилки, провоцирующая конденсацию снаружи и внутри корпуса, – всё это приводит к тому, что устройство перестаёт нормально работать, и возникает необходимость его доработки в части герметизации корпуса. Если с потерей из-за неисправности, проникновения влаги в случае с простым устройством можно смириться, то более сложное устройство с ДУ просто жалко выбрасывать без реанимации. Однако после того, как корпус устройства был обработан для герметизации, оно стало пригодным и для подводного применения (до 3 часов нахождения под водой на глу-

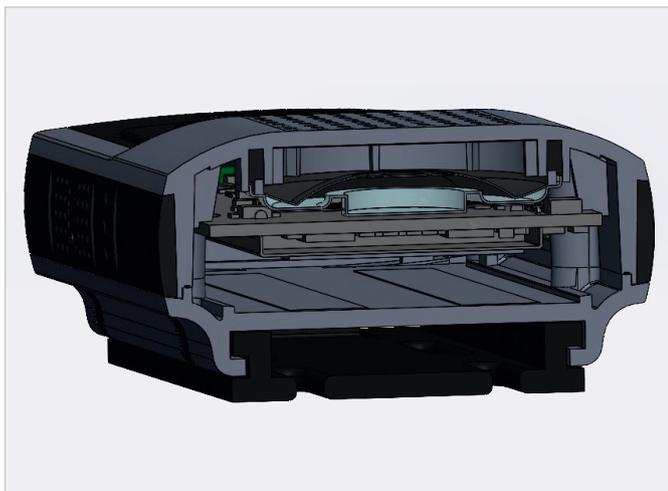


Рис. 13. Иллюстрация герметизации динамической головки

бине до 1 метра). Сделано это с помощью покрытия эпиламом.

Для мелкосерийных и одиночных изделий с невысокими требованиями к пыли- и влагозащите можно заливать их внутренности двухкомпонентным силиконом небольшой твёрдости (10...20 единиц по Шору). Несмотря на то что силикон плохо проводит тепло, этот метод для бытовых устройств РЭА представляется более удобным и рентабельным, чем заливка эпоксидной смолой, делающая конструкцию «одноразовой» и неремонтопригодной. Эпоксидной смолой на практике пользуются, в частности, при монтаже РЭА в устройствах нагнетания давления в фонтанах и насосах разного назначения.

То же касается и залитых компаундом изделий, в том числе заливочного теплопроводящего компаунда, превосходящего в разы по цене типичный силикон для тех же задач. В этом сравнении (силикон или теплопроводный компаунд Номакон КПТД-1, тот же силикон, но с керамическим наполнителем) многое зависит от конкретных задач и назначения РЭА. Можно применять, к примеру, вибростенд. Но можно и иначе: к примеру, силикон можно обработать для качественного процесса с помощью ультразвука, чтобы создать однородную массу материала (герметика) без полостей воздуха (пузырей) или сделать это в условиях вакуума на производстве, под воздействием сжатого воздуха, поданного из компрессора. Также в опытных вариантах можно рекомендовать «Силагерм 2112» марки А (Б и В – иной вязкости), особенно тогда, когда нет необходимости в отводе тепла. Коэффициент теплопроводности

порядка 1,2 в зависимости от марки и партии.

Под уплотнения печатную плату с обычными разъёмами на торцах или с площадками под пайку проводов на одном торце заливают «кольцами». Надо вспомнить, что силикон выделяет кислоту при высыхании и может способствовать окислению проводников. Для высокочастотной РЭА с GSM/GPS модулем это нежелательно. Важно понимать, что плёнка чистого силикона растягивается раз в 5–6, плёнка КПДТ – рвётся почти сразу. К примеру, в Беларуси КПДТ-1 стоит примерно в 3 раза дороже оловянного силикона и в 2 раза дороже платинового. Так что, если не нужно особо отводить тепло, силикон вполне имеет право на жизнь.

Если говорить о примере с корпусом влагозащищённой портативной радиостанции (рис. 4, рис. 7), использовалась динамическая головка с майларовым конусом и защитой IP67. Так, в канавке корпуса радиостанции заложен резиновый уплотнитель, упирающийся в выступ корпуса динамической головки. Это иллюстрирует рис. 13.

Дополнительно клеили мелкую сетку в корпус для защиты от пыли и мелких камушков. Сетка защищает от воды. На качество звука такая герметизация не повлияла.

Прозрачная вставка из материала ПММА используется в качестве закладной детали, а сверху заливается пластик (РС). Полученная пластиковая деталь со стеклом обливается «резиной» (TPU), то есть термопластичным полиуретаном. Стекло имеет штифты, которые предохраняют от сдвига и коробления в процессе заливки вторым компонентом. Стекло или прозрачный пластик (под информа-



Рис. 14. Одна из форм корпуса с закладными металлическими винтами

тивный дисплей) устанавливается между штифтами одной группы и прижимается штифтами другой группы, но сам прозрачный материал штифтов не имеет (или имеет только отверстия под штифты в соответствии с конфигурацией конкретного оборудования). В корпусе подобного формфактора важны и особенности строения бобышек под специальные винты: «заходная» зона и соответствующий квадратный тип отверстия. Литьевая пресс-форма (из двух половинок – матрицы и подвижной части ползуна) при смыкании образуют полость в форме нужной детали. То же уместно применять во всех случаях для герметизации вокруг подвижной вставки ползуна, когда он необходим в конкретном исполнении. Иллюстрация создания такого корпуса представлена на рис. 14.

Стоит отдельно рассказать об эпиламах. Это растворы фторсодержащих поверхностно-активных веществ (ПАВ) – перфторполиэфиров. Они не изобретены сегодня, но два десятка лет назад использовались исключительно в узлах трения. Толщиной до нескольких Ангстрем гидрофобные покрытия – эпиламы значительно изменяют энергетическое состояние на поверхности твёрдого тела. Молекулы ПАВ ориентируются под действием поля твёрдого тела и, взаимодействуя с молекулами масла, препятствуют растеканию последнего из зоны трения. Вследствие происходит снижение коэффициента трения и, соответственно, увеличение ресурса работы узлов [1].

Эпиламирующие составы пригодны для обеспечения влагозащиты микросборки и печатных плат. К преимуществам

Таблица 2. Характеристики некоторых полезных технологий влагозащищённости РЭА

Метод герметизации	Оборудование	Преимущества	Недостатки
Многокомпонентное литьё	ТПА с двумя узлами впрыска и дорогая оснастка	Низкая стоимость при массовом производстве, нет доп. затрат на герметизацию	Неэффективно при малых сериях. Нужно дорогое оборудование, оснастка и персонал высокой квалификации
Овермолдинг	ТПА и несколько комплектов оснастки	Альтернатива многокомпонентному литью. За счёт более простого оборудования технология дешевле на малых партиях	Затраты на манипулятор или ручной труд
Использование уплотнителя	Не требуется	Низкая стоимость, не нужно дополнительное оборудование	Дополнительная операция при сборке (установка уплотнений), нужен крепёж в зоне уплотнения

ствам эпилирующих влагозащитных покрытий разработчики относят:

- гидрофобность;
- химическую и термическую стойкость;
- флюсующие свойства и ремонтпригодность;
- возможность эксплуатации в закрытых объёмах.

Кроме того, покрытие эпиламом рассматривают как использование нанотехнологий в области влагозащиты печатных плат; этот метод также называют нанопокрыванием.

В табл. 2 представлены характеристики некоторых полезных технологий влагозащищённости РЭА.

## Выводы

Согласно мнению автора многих опубликованных работ по теме влагозащиты РЭА В. Уразаева, «вывод – это место в размышлениях, где вы уже устали думать» [7]. Это, конечно, был философ из профессионального цеха, что заметно по всей его деятельности, публикациям и смелым выражениям: «Любая цитата, которая может быть искажена, будет искажена». После Уразаева в части наработок и публикаций влагозащищённости РЭА выросло новое поколение талантливых разработчиков, но его авторитет спустя годы остаётся незыблемым.

Разработчики РЭА обоснованно привыкли уделять внимание влагостойкости элементов и печатных плат, и «за кадром» активного обсуждения появилась проблематика совершенствования влагостойкости и защищённости корпусов как фактор дополнительной надёжности электронных устройств.

На выбор идеального метода герметизации РЭА влияет множество факторов: требования к конструкции, возможности производства, размер партии, предполагаемая стоимость, условия эксплуатации и другие. Эти методы можно комбинировать.

Влияние влаги на диэлектрические свойства электроизоляционных мате-

риалов вполне изучено в соответствии с физическими процессами водопоглощения и влагопроницаемости для большинства электроизоляционных материалов. Проблема повышения влагостойкости РЭА – комплексная проблема. Результат определяется оптимальным сочетанием конструктивно-технологических характеристик устройства, соблюдением рекомендованной технологии обработки, в том числе функциональной гибкости для работы с широким диапазоном покрытий, включая твёрдые материалы non-VOС. В современном производстве принято исходить из разных видов герметизации по назначению РЭА. Даже изготовленный по качественной технологии пластик при склейке, уплотнении, многокомпонентном литье и переформовке ведёт себя неодинаково.

От многокомпонентного литья метод овермолдинга отличается тем, что материалы соединяются не в одном производственном цикле, а в двух последовательных. Для такой переформовки используют оборудование для литья под давлением, но производят две формы: в первой форме получают основную деталь – подложку, а затем перекалдывают её во вторую форму с дополнительной полостью, где поверх заливают другой компонент. Перспективную технологию овермолдинга часто используют для соединения двух половин корпуса или изготовления кнопок. Метод хорош тем, что отливку кнопок можно комбинировать с заливкой эластичного материала вокруг корпуса, повышая таким образом ударпрочность изделия. В овермолдинге используют термопласты, резины или один материал разных цветов. Кроме того, для герметизации конструкций особой надёжности, в том числе военного и космического назначения, практикуют более 5 видов сварки не только для металлов (элементов корпусов), но и для термопластов. Речь идёт о таких видах, как сварка горячей плитой, электромаг-

нитная, вибрационная, ультразвуковая, лазерная и др.

Следует помнить и о том, что влажностные константы определены для диэлектрических материалов в исходном состоянии; соответствующие материалы в процессе обработки подлежат влиянию различных производственных факторов. Именно так изготавливаются элементы конструкций РЭА. При этом исходные свойства диэлектриков могут значительно изменяться, как правило, в худшую сторону.

## Литература

1. Герметизация корпусов для электроники. Часть 1: пластик и резина // URL: <https://habr.com/ru/articles/586112/>.
2. Защита аппаратуры от воздействия влажности // URL: <https://studfile.net/preview/8950038/page:12>.
3. *Кашикар А.П.* Увеличение влагозащищённости многослойных конструкций // *Электрик*. 2021. № 12. С. 23.
4. Маркировка степеней защиты пыленепроницаемости // URL: [https://4pda.to/2023/06/26/414846/kak\\_ponyat\\_chno\\_vashi\\_chasy\\_zaschischeny\\_ot\\_vody/](https://4pda.to/2023/06/26/414846/kak_ponyat_chno_vashi_chasy_zaschischeny_ot_vody/).
5. *Новиков М.И., Фёдоров А.М.* Влагостойкость радиоэлектронной аппаратуры // URL: <https://www.elec.ru/library/nauchnaya-i-tehnicheskaya-literatura/novikov-vlagostojkost-rea/>.
6. Охлаждающая способность эмали // *Журнал Европейского керамического общества*. / Т. 43, вып. 11, ожидание публикации – сентябрь 2023. С. 5014–5025 // URL: <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-the-european-ceramic-society%20/recent-articles>.
7. *Уразаев В.Г.* Влагозащита печатных узлов. М.: Техносфера, 2006.
8. *Чуйкова Л.* Влагозащита радиоэлектронной аппаратуры. Компоненты и технологии // URL: <https://kit-e.ru/vlagozashhita-radioelektronnoj-apparatury/>.
9. Больше подробностей про начинку устройства в этом проекте // URL: <https://promwad.ru/case-studies/razrabotka-cifrovoy-racii-dlya-vodnyh-vidov-sporta>.

