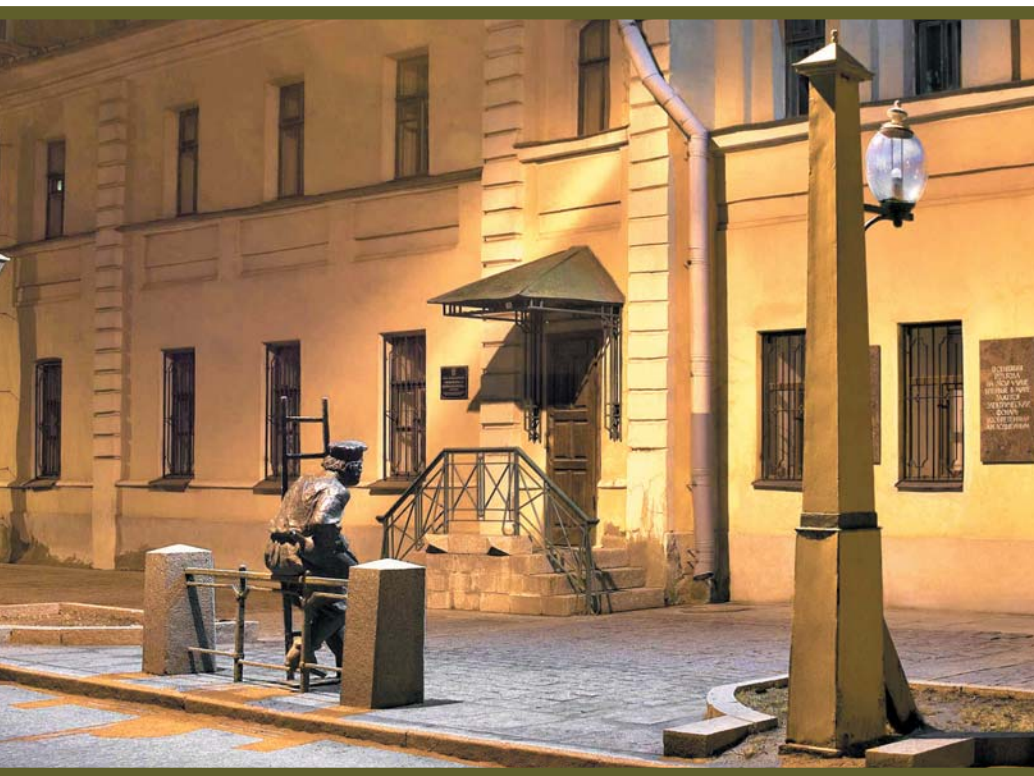


Некоторые особенности VI светотехнической революции в наружном освещении

Часть 1

➔ Рассматриваются закономерности и некоторые особенности череды светотехнических революций в наружном освещении с позиций системного подхода. Дается определение светотехнической революции. Делается прогноз развития текущей революции, которую принято называть светодиодной. Анализируются существующие тенденции и намечаются возможные направления дальнейших инноваций в наружном освещении.



*Чем дальше в будущее входим,
Тем больше прошлым дорожим,
И в старом красоте находим,
Хоть новому принадлежим.*
Вадим Шефнер

Предыстория

Необходимость освещения открытых пространств возникла еще в стародавние времена. Она была вызвана в основном потребностью в передвижении между местами обитания homo sapiens в темное время суток после заката солнца. Веками для этих целей использовались переносные светильники — факелы. Увеличение вечерней активности в более крупных поселениях требовало перехода уже к стационарному наружному освещению (НО). Первые попытки создания НО столкнулись с тем, что как факелы, так и другие светильники горения (костер, лучина и пр.), применяемые для внутреннего освещения (ВО), плохо подходили для стационарного НО [1], поскольку они задувались ветром и заливались дождем. В качестве защиты от внешних воздействий в первых светильниках НО использовались природные прозрачные материалы (слода, селенит и др.), а затем и искусственно созданные (стекло). Такие светильники стали называть фонарями. Из источников света в них чаще стали применять свечи и масляные лампы, а не факелы, поскольку они давали меньше копоти. Один из вариантов переносного фонаря, который можно было использовать и в НО, показан на рис. 1.

Переход к масляному освещению

С возникновением и ростом городов появилась уже острая необходимость в стационарном освещении улиц для повышения безопасности в вечернее и ночное время. В отличие от ВО, в котором преимущественно применялось более удобное в быту, хотя и весьма пожароопасное, свечное освещение, в переносных и стационарных светильниках к середине XVIII века стало преобладать масляное (лампадное) освещение. Причиной этого была не столько более высокая эффективность масляного освещения, сколько меньшие текущие затраты. Действительно, достаточно большой объем резервуара для масла, а также качественный фитиль уже позволяли фонарщику осуществлять обслуживание светильников только два



Рис. 1. Переносной свечной фонарь

раза в сутки — для зажигания и гашения света, совмещая эти операции с подливом топлива, чисткой и регулировкой.

Таким образом, уже в самом начале эволюции искусственного освещения пути развития ВО и НО начали расходиться. Причем наиболее важным фактором, повлиявшим на становление масляного НО, была необходимость обеспечения длительного горения при минимальном присмотре за светильниками.

Первоначально в масляных светильниках в качестве топлива использовались растительные масла, позднее — спиртоскипидарная смесь, а затем (с 1850-х) — более дешевый керосин, который меньше коптит и имел более высокую энергоэффективность. Такого рода частные модернизации, существенно влияющие на эффективность освещения, будут присущи и большинству следующих технологий. Важно также отметить, что быстро растущий спрос на керосин в конце XIX века оказал решающее влияние на становление и рост нефтедобывающей отрасли.

Несмотря на неторопливость становления масляного НО, этот процесс, по аналогии с последующими событиями, вполне можно называть I светотехнической революцией. Ведь именно тогда и произошло формирование уличного освещения как технологии, оказавшей большое влияние на вечерний образ жизни в городах. Характерно, что уже в то время были распространены гибридные решения, являющиеся переходными формами между технологиями.

Например, к началу XX века в армиях ряда европейских стран получили широкое распространение универсальные переносные масляные светильники, используемые при ночных марш-бросках. Такой светильник (рис. 2) имел втулку для установки в ствол винтовки и проводочные держатели для подвески на пояс. А если все масло сгорало, то в светильник можно было установить свечу.

Каждая следующая революция порождала различные переходные и гибридные формы технологий, зачастую весьма причудливые.

Газовая революция

Существенного уменьшения расходов на текущее обслуживание уличного освещения удалось достичь при внедрении газового освещения. Именно это было основной движущей силой II светотехнической революции, не случайно совпавшей по времени с I промышленной революцией. В состав технологической цепи газового освещения входили газовые заводы, добывающие светильный газ из угля или дров, газгольдеры — хранилища газа, газовые распределительные сети и собственно светильники — газовые рожки. Благодаря централизованному газоснабжению были исключены характерные для масляного освещения операции подлива горючего и чистки фитиля, обеспечено автоматическое гашение света. Дальнейшей модернизацией газовой технологии была автоматизация процесса ежевечернего зажигания света. В ранних вариантах для этого использовался специальный запальный огонек, оставляемый на дневное время, что позволило обеспечить единовременность зажигания света и отказаться от труда

большого количества фонарщиков. В более поздних вариантах при конкурировании с электрическим освещением уже в рамках III светотехнической революции применялся также электрический поджиг газа в фонарях.

Некоторые соображения по ходу эволюции НО

С появлением газового освещения появляется и понимание уличного освещения как технологии, в которой собственно светильники представляют только видимую ее часть. При этом в результате создания весьма недешевой инфраструктуры (газовые заводы и распределительные сети) не только достигается повышение комфортности освещения улиц, но и существенно сокращаются численность обслуживающего персонала и текущие расходы. Газовое освещение внедрялось, прежде всего, в центрах городов, откуда оно распространялось на окраины, вытесняя масляное освещение, что и стало основным направлением совершенствования НО в XIX веке.

Опираясь на анализ, проведенный в работах [1–3], историю развития НО предлагается рассматривать как череду сменяющих друг друга основных технологий освещения. Причем каждая следующая технология, для того чтобы стать основной, должна была иметь над предыдущей очевидные преимущества для ее вытеснения и занятия господствующего положения в НО на достаточно долгий исторический период. Три уже упомянутые основные технологии базировались на светильниках горения: первая — факельно-свечная технология, вторая — на жидком топливе и третья — газовая. Три следующие



Рис. 2. Универсальный масляный светильник из коллекции Военного музея в Будапеште

технологии основаны на использовании источников электрического освещения: четвертая — на лампах накаливания (ЛН), пятая — на ртутных лампах высокого давления (РЛВД), шестая — на натриевых лампах высокого давления (НЛВД). В качестве кандидата на следующую, седьмую основную технологию будем рассматривать инновационную технологию НО на светодиодах (СД).

Происхождение и подробный разбор каждой из технологий были представлены в работах [1–3]. Наибольший интерес вызывают переходы от одной основной технологии к другой, а также побудительные причины и некоторые особенности этих переходов, которые заслуживают названия светотехнических революций. В анализе будут активно использоваться методы реконструкции [4] и реинвентинга [5], с помощью которых необходимо в максимально возможной полноте восстановить логику развития НО.

Сразу же следует отметить, что некоторые перспективные технологии освещения, имевшие поначалу хорошие шансы на совершение революционного переворота и попадание в разряд основных технологий, при попытке их массового внедрения терпели относительные неудачи. Поясним данный тезис на примере технологии дугового угольного освещения. Демонстрация этой технологии в 1878 г. в Париже и Лондоне в период господства

газового освещения представлялась началом электрической светотехнической революции. Действительно, П.Н. Яблочкову удалось изобрести первый электрический источник света, пригодный для серийного производства, — «электрическую свечу». В отличие от предшественниц, она не требовала автоматической или ручной стабилизации расстояния между сгорающими электродами. Электроды в «электрической свече» располагались параллельно, а промежуток между ними заполнялся сгорающим каолиновым изолятором. «Электрическая свеча» резко увеличила освещенность улиц по сравнению с общеупотребимыми в то время масляными и газовыми светильниками.

Одновременно Яблочкову удалось решить ряд проблем, связанных с созданием первых электрических сетей освещения на переменном токе [2], что и позволило вывести технологию дугового освещения из стен лабораторий на улицы городов. Однако эта технология не смогла одержать победу в конкурентной борьбе по чисто экономическим соображениям. Малый срок службы «электрических свечей» требовал их частой замены и увеличивал затраты на обслуживание. Попытки спасения этой технологии путем автоматизации процедуры замены свечей приводили к большим осложнениям в конструкции светильников, уменьшению их надежности и увеличению стоимости. Окончательную

точку в завершении череды модернизаций технологии дугового НО поставило быстрое развитие другой электрической технологии (следующей основной после газовой) — освещения ЛН.

Сравнение различных технологий НО по экономическим характеристикам представляет собой весьма сложную задачу. Даже современные конкурирующие технологии нелегко сопоставить по стоимостным показателям. Поэтому для первоначального наглядного сравнения технологий и обзора хода их эволюции придется выбрать более доступный параметр — энергоэффективность источников света. При этом важно отследить изменение эффективности как в каждой эволюционирующей технологии, так и при революционных переходах от одной технологии к другой. Результаты этих изысканий представлены в виде соответствующих графиков на рис. 3. Кривые энергоэффективности основных технологий и главных кандидатов в основные показаны цветными графиками, эффективности прочих технологий — по большей части графиками белого цвета.

Эволюция технологий НО растянулась на несколько веков, при этом она характеризуется наличием участков как с большими ускорениями, так и с относительно медленным ростом. Кроме того, переходы от одной технологии к другой давали увеличение энергоэффективности до 2–3 раз. Поэтому для наглядного представления таких непростых процессов приходится выбирать нелинейные масштабы: логарифмический — по оси абсцисс и экспоненциальный — по оси ординат. Сложность такого исследования усугубляется тем, что достоверные данные по энергоэффективности доступны лишь по технологиям электрического освещения. Данные о предшествующих технологиях были получены непрямыми методами, тем не менее есть уверенность, что это существенно не исказит результат анализа. Для справки на рис. 3 приведена также величина энергоэффективности Солнца как источника света, питаемого встроенным термоядерным реактором. Эти сведения заимствованы из расчетов, приведенных в работе [6].

Светотехнические революции отображены на рис. 3 в виде тонированных переходов между графиками энергоэффективности основных технологий. Причем каждый скачок в энергоэффективности источников света во время светотехнических революций

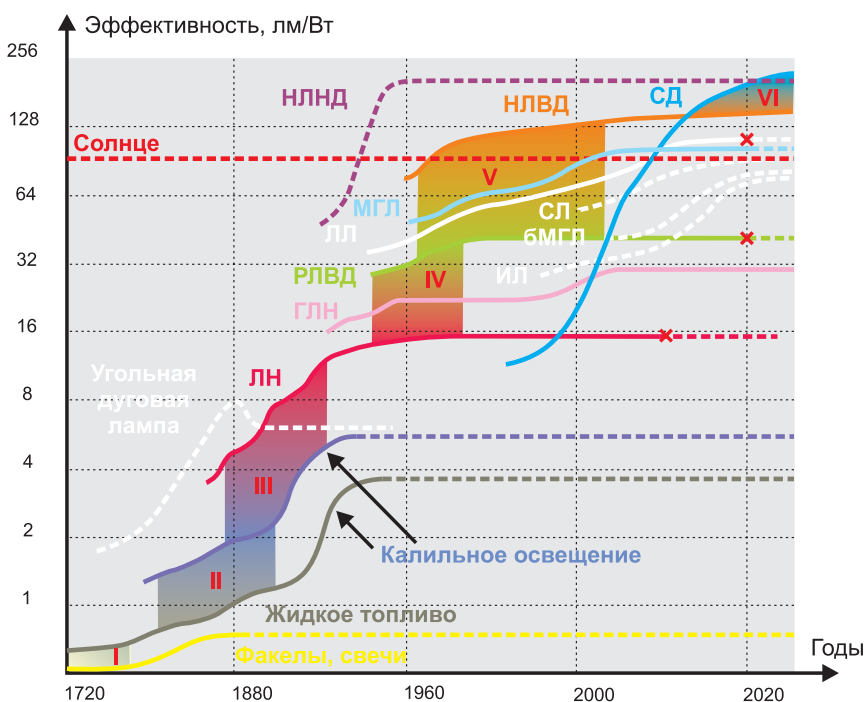


Рис.3. Графики энергоэффективности технологий освещения

приводил наряду с другими факторами к существенному уменьшению общих затрат на НО, о чем, правда, можно судить только по отрывочным сведениям и косвенным данным. Например, известно, что первая система масляного освещения центральных улиц Санкт-Петербурга, установленная в 1723 г., содержала 595 масляных фонарей и обслуживалась специально созданной командой из 64 человек. Зная численный состав современного предприятия, эксплуатирующего НО Санкт-Петербурга, — ГУП «Ленсвет» — и число уличных светильников, несложно подсчитать, что количество персонала, обслуживающего одинаковое количество светоточек, уменьшилось за три столетия примерно в 40 раз. Если учесть, что за это же время произошло увеличение энергоэффективности источников света почти в 150 раз, то в пересчете на один килолюмен светового потока получим увеличение производительности труда примерно в $150 \times 40 = 6000$ раз с соответствующим уменьшением приведенных затрат на обслуживание.

Каждая из рассматриваемых технологий НО претерпевала этапы становления, быстрого роста и относительного замедления, определяемые потенциалом развития и естественным ограничением — достижимым пределом эффективности. Это нашло отражение в виде характерных S-образных изгибов графиков, соответствующих по форме так называемой «логистической» кривой (кривой Ферхюльста [7]). В большинстве графиков энергоэффективности наблюдаются неоднократные S-образные изгибы, которые объясняются частными улучшениями технологий. Например, масляные светильники, кроме упомянутых усовершенствований, вызванных сменой горючего вещества, проходили через ряд системных обновлений. Среди них следует отметить модернизации, связанные с появлением лампового стекла (1756), с использованием широких и кольцевых фитилей (1753 и 1790), с увеличением их стойкости к высокой температуре, с подачей горючего под давлением (1789) и с применением калильных сеток (1885). Все это позволило в рамках одной этой технологии существенно повысить яркость светильников и увеличить их эффективность до 10 раз.

В целом, и суммарный график всей светотехнической эволюции также представляет собой S-образную кривую. При этом предел достижимой энергоэффек-

тивности источника света может быть оценен в 300 лм/Вт [8], что составляет около половины теоретического предела энергоэффективности идеализированного преобразователя электроэнергии в световую энергию видимого диапазона излучения. Для СД-светильников НО возможный предел эффективности может составить примерно 250 лм/Вт [9]. Таким образом, из этих рассуждений можно сделать вывод, что современные источники света НО близки к исчерпанию возможности существенного прироста эффективности. Если это так, то прогресс в НО будет связан в дальнейшем лишь с частными модернизациями СД-технологии.

Замечание о границах революций

Границы светотехнических революций на графиках определены условно. Левую границу предлагается определять по возникновению и началу внедрения новой основной технологии освещения. Правую границу (завершение революции) условимся устанавливать в тот момент времени, когда оборудование для новой технологии выходило в серийное производство и когда она получала преимущество над предыдущей по количеству действующих светоточек. Например, вывод о том, что «натриевая» революция в НО России завершилась всего лишь несколько лет назад, был сделан по опросу организаций, эксплуатирующих городское освещение. Результаты этого опроса, проведенного ВНИСИ в 2012 г., представлены в таблице.

Переходы от одной технологии к другой происходили в процессе эволюции НО, как правило, в течение довольно продолжительной борьбы, влияющей на обе конкурирующие технологии. При этом в городском освещении могли оставаться и достаточно долго сохраняться остатки более старых технологий. Так, в отдельных малых российских городах до половины светильников еще недавно были оборудованы ЛН, что зафиксировано в том же опросе. Известно, что в Берлине и в ряде других городов Европы до нашего времени сохранились установленные еще после Второй мировой войны, в услови-

ях острого дефицита электроэнергии, десятки тысяч газокалильных светильников [1]. При этом их эксплуатация обходится примерно в 4 раза дороже электрического освещения не только из-за меньшей энергоэффективности, но и из-за больших затрат на обслуживание. Характерно, что современные газокалильные светильники запитываются уже не светильным газом, а природным газом из газопроводов.

В последнее же время наблюдается тенденция искусственного вытеснения устаревающих технологий. Причем все чаще этот процесс начал носить запретительный характер и иметь вид принудительного прерывания, активно лоббируемого адептами инноваций. Наиболее известен запрет на производство, начиная с 2013 г., ЛН мощностью свыше 100 Вт, а затем, через несколько лет, и ЛН меньшей мощности. Менее известно, что с 2020 г. согласно Минаматской конвенции по ртути запрещается производство ЛЛ с содержанием ртути более 5 мГ, а также производство «ламп общего освещения ртутных высокого давления паросветных (РВДП)». Очевидно, что под этот запрет подпадают ЛЛ формата T12 и более (с диаметром трубки от 12/16 дюйма), а также все типы РЛВД. Минаматская конвенция по ртути была подписана представителем России в сентябре 2014 г.

Запреты на производство источников света отражены на графиках косыми красными крестами.

Вернемся, однако, от общих соображений к анализу конкретных шагов развития III светотехнической революции.

III (она же первая электрическая) светотехническая революция

Первый опытный участок НО на вакуумированных ЛН с графитовыми стерженьками, как известно, был продемонстрирован А.Н. Лодыгиным еще в 1873 г. в Санкт-Петербурге. Далее ЛН имели несколько существенных модернизаций, нашедших частичное отражение на нашем графике.

Т а б л и ц а . Распространение источников света в городском освещении России в 2012 г.

Тип лампы	Средняя доля ламп (%) по городам с населением (тыс. чел.)		
	50–100	100–500	>500
НЛВД	36	46	67
РЛВД	55	48	28
ЛН	≈7	≈6	≈5

Важнейшими из них следует считать изобретение вакуумированных ламп с угольными нитями и дальнейшее их усовершенствование рядом ведущих производителей до газонаполненных ламп с вольфрамовыми спиралями.

Принципиальными достижениями того времени были также массовое строительство электростанций и электрических сетей, а также переход к конвейерному производству ламп с многократным снижением их себестоимости. Отметим также, что быстрое развитие электрического освещения на рубеже XIX и XX веков дало старт широкому применению электричества во многих сферах.

Дальнейшая модернизация ЛН привела к разработке галогенных ламп накаливания (ГЛН), а также ГЛН с инфракрасным экраном, обеспечивающих увеличенный срок службы и повышенную светоотдачу. Однако свойственное ГЛН малое напряжение питания требует применения в каждом светильнике НО дополнительного трансформатора, что не позволяет получить приемлемый срок окупаемости в такой технологии. В результате ГЛН нашли применение в основном в малогабаритных светильниках ВО.

Одной из самых примечательных черт III революции стал переход к универсальной технологии ЛН как для НО, так и для ВО. Характерно, что в дальнейшем эволюции НО и ВО шли параллельными, практически непересекающимися путями, а потом опять встретились в новейшей истории — в VI светодиодной революции.

Отметим также, что III революция инициировала появление своеобразной модернизации газовой технологии освещения — газокалильного освещения, которое, по сути, является переходным от газовой технологии к накальной. В этой технологии используются сетчатые колпачки, пропитанные смесью редкоземельных слаборадиоактивных металлов тория и церия, которые дают яркий свет при нагреве в газовом пламени. На рис. 4 представлены современные газокалильный и светодиодный фонари, установленные в Александровском саду Санкт-Петербурга у памятника Н.М. Пржевальскому. В наше время в развивающихся странах также довольно широко распространена технология керосинокалильного освещения, обеспечивающая автономное освещение в неэлектрифицированных районах.

IV революция — газоразрядная

Во время следующей, IV газоразрядной революции пути развития технологий в НО и ВО начали расходиться. С середины XX века для ВО стали применяться ртутные ЛЛ вследствие большей, чем у ЛН, энергоэффективности. Однако в НО они не смогли найти применения в основном из-за снижения работоспособности при отрицательных температурах. Более поздний этап модернизации ЛЛ — компактные ЛЛ (КЛЛ) — представлял собой создание ламп для прямой замены ЛН. Компактность КЛЛ обеспечивалась скручиванием газоразрядной трубки в спираль

и использованием миниатюрного электронного устройства управления. В результате такие КЛЛ сравнялись по габаритам с ЛН, имеющих соразмерный световой поток. Для использования же в НО такой вариант источника света по понятным причинам не рассматривался.

Дальнейшие исследования разряда паров ртути, но уже при высоком давлении в среде нейтрального газа аргона, привели к созданию мощного компактного излучателя в диапазонах ультрафиолетового и голубого света — инновационной кварцевой горелки и собственно ртутной лампы высокого давления (РЛВД). Такая лампа вследствие высокой температуры горелки была вполне работоспособна в условиях НО. Применение люминофора, наносимого на внутреннюю сторону наружной колбы, обеспечило спектр излучения РЛВД, приближенный к солнечному (аналогично ЛЛ), и эффективность до 50 лм/Вт.

Характерно, что уровень электроники того времени не позволил создать импульсное высоковольтное зажигающее устройство (ИЗУ) достаточной надежности для работы в условиях НО. Поэтому в первых РЛВД, предназначенных для НО, разряд зажигался с помощью внедренных в конструкцию горелки двух дополнительных электродов. Такая четырехэлектродная конструкция горелки с конца 1960-х г. стала для РЛВД типовой. В дальнейшем удалось разработать конструкцию горелки с одним зажигающим электродом, обладающую несколько большей надежностью. Созданные же еще в конце 1950-х г. РЛВД с двухэлектродной горелкой (отечественная марка ДРТ) применялись в основном как мощные ультрафиолетовые излучатели для ВО.

Важно отметить, что РЛВД из-за падающей вольт-амперной характеристики приходилось подключать к сети переменного напряжения, как правило, через силовой дроссель, который стабилизировал ток и ограничивал его при пуске. Такая схема дает существенный фазовый сдвиг тока потребления, недопустимый для сети общего назначения, поэтому приходится применять еще и дополнительный конденсатор большой емкости для обеспечения приемлемого коэффициента мощности.

Интересный вариант РЛВД — дуговая ртутно-вольфрамовая лампа (ДРВ) — был разработан для того, чтобы стало возмож-



Рис. 4. Газокалильный (слева) и светодиодный фонари

ным непосредственно заменять ЛН в существующих светильниках без использования силового дросселя и компенсирующего конденсатора. ДРВ представляет собой последовательно включенную ртутную горелку и спираль лампы накаливания (рис. 5), которая, заменяя дроссель, дает еще и дополнительный световой поток. При этом спираль устанавливается в той же внешней колбе лампы. Лампы ДРВ, предназначенные для утилитарного освещения, имеют люминофор на внутренней стороне наружной колбы (как у ДРЛ). В классификации технологий освещения такие ДРВ можно отнести к одному из видов гибридных технологий. При этом из-за меньшей, чем у «классической» РЛВД, эффективности (не превышающей 30 лм/Вт), увеличенных пусковых токов и пониженного срока службы (до 4000 ч) лампы ДРВ чаще использовали для замены запрещенных ЛН большой мощности. Наиболее актуальным такой подход оказался при модернизации старых светильников «зонтичного» типа в цеховом ВО.

Дальнейшим развитием конструкции РЛВД стали металлогалогенные лампы (МГЛ), их отечественная маркировка — ДРИ. Эта модернизация заключалась в добавлении в горелку к парам ртути галогенидов ряда металлов. В результате был получен расширенный спектр излучения без использования люминофора. Существенно возросла и эффективность. Благодаря уменьшению размера светящегося тела до размера горелки стало возможным создание светильников с кривой силы света (КСС) типа К (концентрированной) и типа Ш (широкой). Такие свойства МГЛ позволяли наиболее успешно использовать их как в прожекторах (КСС типа К), так и в уличных светильниках (КСС типа Ш), которые обеспечивали лучшую равномерность освещения дорог.

Однако появление МГЛ не привело к существенным изменениям в утилитарном НО, поскольку они были дороже и требовали применения мощных ИЗУ. К тому же в это время появились натриевые лампы высокого давления (НЛВД) с еще более высокой эффективностью, что вызвало уже следующую светотехническую революцию. Применение же МГЛ оказалось наиболее выгодным там, где требовался повышенный коэффициент цветопередачи, — в парковом и спортивном освещении, для телевидения и в архитектурной подсветке.



Рис. 5. Одна из разновидностей дуговой вольфрамовой лампы

V революция — натриевая

Высокоэффективное излучение паров натрия первоначально было использовано в натриевых лампах низкого давления (НЛНД). В этих лампах была достигнута рекордная эффективность — около 200 лм/Вт. Однако почти монохроматическое излучение НЛНД приводило к дискомфорту из-за неразличимости цветов освещаемых объектов. В наше время НЛНД применяются в малоответственных производственных помещениях и на складах, а в НО они практически не используются.

В действительности же, в НО натриевая революция стартовала с того, что в рамках конверсии военного производства удалось создать надежную керамическую прозрачную горелку, способную удерживать раскаленные агрессивные пары натрия при повышенном давлении. За счет расширения спектра излучения при высокой температуре паров натрия коэффициент цветопередачи удалось довести до приемлемой в НО величины. В результате были созданы натриевые лампы высокого давления (НЛВД) с энергоэффективностью до 150 лм/Вт. Их отечественная маркировка — ДНаТ.

Достижения полупроводниковой техники того времени позволили создать мощное и надежное тиристорное ИЗУ и обеспечить применение горелок с двумя выводами, что увеличило надежность и долговечность НЛВД по сравнению с РЛВД. В дальнейшем развитие электроники привело к тому, что взамен электромагнитного пускорегулирующего аппарата (ПРА), состоящего из дросселя, конденсатора и ИЗУ, был разработан электронный ПРА (ЭПРА).

Применение ЭПРА позволяет повысить эффективность преобразования, стабилизировать световой поток светильника и потребляемую мощность при изменении напряжения в сети. Ведь известно, что при изменении питающего напряжения на $\pm 10\%$ световой поток НЛВД с ПРА может изменяться на $\pm 40\%$, а потребляемая мощность — на $\pm 25\%$ [3]. Это является весьма актуальным при ночных сбросах нагрузки в городских сетях, приводящих к скачкам напряжения. Кроме того, становится возможным снижение требований к падению напряжения в осветительной сети, особенно в конце линий освещения, что позволяет уменьшить сечение сетевых проводов.

Важно отметить, что натриевая революция не затронула такой важнейшей отрасли, как железнодорожная. Специалисты связывают это с тем, что на железной дороге основное внимание традиционно уделяется повышенным требованиям по безопасности, чему желтый свет натриевых светильников, по мнению железнодорожных экспертов, не соответствует. Экономия же электроэнергии на электрифицированных железных дорогах была относительно незначительной вследствие того, что основное потребление шло на нужды электрической тяги. Такое состояние освещения на железных дорогах поспособствовало в дальнейшем активному внедрению СД в этой сфере.

К гибридным технологиям в V революции следует отнести натриевые лампы для прямой замены РЛВД (их отечественная марка — ДНаС). Использование в горелке ДНаС специальной неона-аргоновой смеси (смесь Пеннинга) и применение так назы-

ваемой «пусковой антенны» обеспечили зажигание разряда без применения ИЗУ. Светоотдача ДНаС выше, чем у РЛВД, но существенно меньше, чем у НЛВД. Это ограничило сферу их применения заменой морально устаревших РЛВД без переоборудования светильников.

Безэлектродные газоразрядные светильники

Рассматривая этапы газоразрядной революции в НО, нельзя обойти вниманием бесконтактные газоразрядные лампы. Они вызывают большой интерес ввиду лучшей герметизации разрядного пространства и возможности получения большего срока службы. Известно, что возбуждение газового разряда электромагнитным полем практиковал еще Н.Тесла, однако создание промышленных образцов безэлектродных ламп началось только во второй половине XX века.

Первой из безэлектродных ламп была создана так называемая индукционная лампа (ИЛ), которая фактически является бесконтактной преемницей ЛЛ. За счет электромагнитного возбуждения газового разряда в кольцевой люминесцентной трубке удалось получить вполне конкурентоспособный источник света. Благодаря предварительному прогреву амальгамы ртути, ИЛ обеспечивает работу при низких температурах. Однако ИЛ имеет еще больший размер тела свечения, чем, например, РЛВД, что не позволяет, при приемлемых габаритах отражателя, создать светильник с КСС типа Ш. Это существенно осложняет создание равномерной освещенности дороги при редко расположенных опорах НО.

Второй в этом ряду была разработана серная лампа (СЛ), имеющая сплошной «солнечный» спектр и минимальные габариты светящегося тела. Однако магнетронное возбуждение серной плазмы, необходимость электромагнитного экранирования и вентиляторное охлаждение приводят к высокой стоимости и пониженной надежности светильников.

Совсем недавно появился еще один тип безэлектродной лампы — металлогалогенная (БМГЛ). В ней разряд возбуждается электромагнитным полем диэлектрического объемного резонатора.

Относительно большая стоимость безэлектродных ламп и не самая высокая эффективность, не превышающая 100 лм/Вт, позволяет им конкурировать с традиционными газоразрядными светильниками

в сравнительно узких сферах, где требуется большой срок службы ламп и хорошая цвето-передача, таких как музейное, спортивное (СЛ) и цеховое освещение (ИЛ).

В утилитарном уличном НО ни одна технология из семейства «безэлектродных» пока не может на равных соперничать с технологией НЛВД.

Краткие итоги пяти революций

История эволюции технологий НО включает в себя множество разнородных и взаимосвязанных процессов, которым свойственны как большие различия, так и отдельные общие черты.

Важно отметить, что, наряду с последовательной модернизацией собственно светильников, одной из важных черт эволюции является развивающаяся тенденция декомпозиции систем НО с последовательным отчуждением элементов и отдельных фрагментов технологий и выделением их в подсистемы НО. В крайних случаях такие элементы могут выделяться даже во внешние системы. Так, в I революции произошло отделение хранилища горючего вещества (масла) от зоны горения, во II — еще большее отдаление хранилища горючего вещества (светильного газа) от светильников с созданием отдельной подтехнологии его получения и распределенного снабжения. Революция III (правда, не сразу) вообще вынесла за рамки системы НО процесс добычи энергии для освещения, оставив в своем составе сети распределения и светильники. В IV и V революциях эта тенденция прослеживается в гораздо меньшей степени вследствие того, что электроэнергия была де-факто признана идеальным видом энергии, легко передаваемой на большие расстояния, а трехфазные электрические сети с начала XX века считались базальтернативной средой ее передачи. Зато ухищрения в создании электрических источников света довели их энергоэффективность до весьма высокого уровня, приближающегося уже к максимально достижимому.

Отметим, что в процессе многочисленных модернизаций технологий НО происходят как инновационные прорывы в создании новых технологий, так и разработки совместимых, гибридных и компромиссных решений. Для дальнейших рассуждений важно зафиксировать, что в эволюции светотехнических систем (по давно замеченной аналогии с биологической эволюцией) искусственно выведенные гибридные виды могут обладать набором требуемых свойств, однако, как правило,

они имеют пониженную жизнеспособность и обычно представляют собой тупиковые ветви развития. Как можно убедиться, в рассматриваемой светотехнической эволюции эта тенденция прослеживается достаточно отчетливо. Так, из всех перечисленных выше гибридных технологий, пожалуй, только две нашли признание — это КЛЛ и, в меньшей степени, ДРВ, причем обе для ВО. Все остальные технологии, даже дающие существенный прирост эффективности (например, дуговая и калильные технологии освещения), не смогли претендовать на завоевание существенной доли рынка как в ВО, так и в НО.

Попытаемся теперь с новыми взглядами на эволюцию и с вновь выработанными критериями заняться анализом первых шагов развития кандидата на следующую основную технологию.

Светодиодная технология

Бурная история развития СД-технологии была рассмотрена в работе [3]. В рамках настоящего исследования наиболее интересны несколько последних лет, когда появились многочисленные варианты уличных СД-светильников и обозначилась серьезная претензия новой технологии на звание основной в НО.

Внедрение СД-технологий совершенно естественным образом началось в области ВО. В условиях незавершенной череды модернизаций газоразрядной технологии это вызвало, прежде всего, ускорение замены запрещаемых ЛН и ЛЛ устаревших и малоэффективных форматов (от Т12 и выше). При этом позиции КЛЛ серьезно не пошатнулись. Более того, появились трубчатые ЛЛ форматов Т5 и Т8 (с диаметром трубки 5/16 и 8/16 дюйма) с энергоэффективностью, превысившей 100 лм/Вт, которые в некоторых областях применений могут конкурировать со СД.

В то же время в железнодорожной отрасли существенное, более чем двукратное, превышение энергоэффективности СД над РЛВД послужило толчком для ряда пилотных проектов, а затем и для широкомасштабного внедрения СД-светильников в РЖД. При этом, учитывая большую стоимость СД-светильников, сроки окупаемости СД-проектов при замене РЛВД могут доходить до трех лет [10] и более. Что же касается пилотных проектов городского НО, где замене подвергаются более эффективные, более надежные и более распространенные НЛВД, то отечественные проекты пока

имеют сроки окупаемости, существенно превышающие эту величину.

При этом необходимо отметить, что ресурс модернизации натриевой технологии, связанный с применением методов энергосберегающего управления, по ряду причин не используется в полной мере, несмотря на все имеющиеся возможности, включая законодательно закрепленные [3]. Одна из причин заключается в недостаточной кратности диммирования (регулирования яркости) натриевых светильников и существенном снижении энергоэффективности при управлении. Вторая причина заключается в том, что для получения приемлемого срока окупаемости такой технологии необходимо иметь сверхнадежные ЭПРА с наработкой на отказ, в несколько раз превышающей срок службы лампы, что требует весьма высокой культуры разработки и производства.

Методы энергосберегающего управления СД-светильников в НО, несмотря на гораздо лучшую управляемость [2], также не нашли пока должного воплощения. В целом же в России да и за рубежом отсутствует общепринятая концепция, в которой бы содержались технические требования к интеллектуальной системе управления СД городским освещением. В результате большинство отечественных пилотных СД-проектов НО представляют собой простую замену ртутных и натриевых ламп или светильников на светодиодные. Типовые варианты таких решений показаны на рис.6 и 7. Один из реализованных СД-проектов НО представлен на рис. 8.

Возникает закономерный вопрос: а, собственно, началась ли VI революция в НО?

Изучение передового зарубежного опыта показывает, что крупные проекты СД-освещения становятся реальными благодаря проведению целого ряда мероприятий, нехарактерных для рыночной экономики в ее классическом виде. Например, проект освещения Лос-Анджелеса [3] получил мощную правительственную поддержку (программа Министерства энергетики США CALIPER) и весьма существенную поддержку неправительственных организаций (фонд Клинтон, ассоциация 40 мегаполисов и др.). Практикуются также проектное финансирование и инвестиционное кредитование, различные формы государственно-частного партнерства, создание ассоциаций производителей светодиодной продукции, запреты на производство конкурирующих видов

продукции, ведение мощной пропаганды и рекламы в печатной и электронной прессе, задействование экологического движения и т. п.

Ни одна предыдущая революция, до V включительно, не требовала даже малой доли усилий такого масштаба. Отчасти это объясняется тем, что попытки модернизации при приближении к максимальным характеристикам по светоотдаче источников света и к пределу рентабельности технологий становятся все более затратными и требуют мобилизационных усилий. Если же принять во внимание, что проводимые исследования создают нам достаточно ясный облик следующей основной технологии, то возникает соблазн искусственного ускорения технического прогресса методами централизованного регулирования [11].

Осталось только выяснить, насколько ясен нам облик следующей основной технологии.

Проведенные изыскания показали, что прямая замена НЛВД на СД-светильники, практикуемая по аналогии с заменой светильников, проводимой в IV и в V революциях, не дает решающего экономического эффекта и, скорее всего, не может стать единственной движущей силой VI революции. Такая модернизация в каком-то смысле больше походит на использование ламп прямой замены, что роднит ее с гибридными технологиями прошлого. В действительности же, как было показа-



Рис. 6. Пример СД лампы НО для «прямой замены» лампы ДРЛ-150



Рис. 7. Типовой светодиодный светильник для замены светильника с лампой ДНаТ 150

но в работе [3], наряду с модернизацией светильников важнейшей частью новой основной технологии НО должно стать использование дополнительных возможностей по снижению суммарных затрат за счет более полного использования энерго- и ресурсосберегающего управления. В такой системе управления на первый план будут выходить уже вопросы надежности оборудования, управляемости,



Рис. 8. Пилотный проект светодиодного освещения одной из магистралей Санкт-Петербурга

достоверности и полноты диагностики, а также информационной безопасности. Во многих внедряемых в последнее время пилотных проектах светодиодного НО этим вопросам не уделяется должного внимания. Например, используемые в ряде проектов методы управления сетями городского освещения по радиоканалу и по каналам сотовой связи вызывают большое сомнение с точки зрения степени их защищенности от кибератак. Как сообщается в исследованиях западных аналитиков, наиболее уязвимыми целями в грядущих кибервойнах будут объекты энергетической инфраструктуры, особенно системы интеллектуального управления [12].

Промежуточный вывод и постановка задачи синтеза

На первом этапе расследования получены убедительные аргументы, подтверждающие необходимость серьезной корректировки стратегии развития нарождающейся СД-технологии НО. Необходимость такой корректировки важна еще и потому, что развивающаяся VI светотехническая революция в НО, как было показано выше, вполне может оказаться последней. Поэтому в новую технологию необходимо закладывать решения, которые, с одной стороны, не устареют после нескольких лет эксплуатации, а с другой — минимизируют затраты на неизбежные частичные модернизации в будущем.

Становится очевидным, что, в отличие от предыдущих революций в НО, в этой более важную роль следует отводить ме-

тодам энергоэффективного управления, которые способны дать больший экономический эффект, чем простая замена ламп. Причем одними из важнейших задач являются формирование и стандартизация требований к интеллектуальным энергоресурсосберегающим системам управления такого рода.

В дальнейшем мы рассмотрим развитие методов управления в НО и решение композиционной задачи по синтезу новой технологии с учетом потенциала энерго- и ресурсосбережения с целью обеспечения ей конкурентных преимуществ.

Необходимо также проанализировать возможности модернизации «старой» натриевой технологии и «безэлектродных» технологий, которые могли бы дать им возможность соперничать с быстро развивающимся конкурентом. ●

Продолжение следует.

Литература

1. Зотин О. Т. Управление освещением открытых пространств. Часть 1 // Полупроводниковая светотехника. 2014, № 1.
2. Зотин О. Т. Управление освещением открытых пространств. Часть 2 // Полупроводниковая светотехника. 2014, № 2.
3. Зотин О. Т. Управление освещением открытых пространств. Часть 3 // Полупроводниковая светотехника. 2014, № 3.
4. Martino Joseph. Technological Forecasting for Decision Making (2nd edition) // North-Holland. 1983.
5. Орлов М. А. Нетрудная ТРИЗ. Универсальный практический курс. М: СОЛОН-Пресс. 2014.

6. Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, MX-Electronic / Die Lichtausbeute der Sonne. LICHT, 2012, № 7, 8.
7. Verhulst, P. F., Recherches Mathématiques sur La Loi D'Accroissement de la Population, Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles, 18, Art. 1, 1-45, 1845 (Mathematical Researches into the Law of Population Growth Increase).
8. Приоритеты технологического развития светотехники. Консолидированный обзор / Составители: А. С. Мартынов, В. В. Семикашев. Участники обсуждения: А. Э. Юнович, Ю. Б. Айзенберг, А. О. Кокорин, Т. М. Галиева. 2010. http://solex-un.ru/sites/solex-un/files/energo_review/konsolidirovanny_obzor_-_priority_tehnologicheskogo_razvitiya_svetotehniki--.pdf
9. Yukio Narukawa, et al. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. J. Phys. D: Appl. Phys. 43 (2010) 354002 (p. 6).
10. Мелинова Л. В., Куликов В. И., Шамьянов С. А., Мелинова Н. А. Поиск энергоэффективных вариантов освещения моста через плотину Волжской ГЭС // Энергосовет. 2014, № 6 (37).
11. Глазьев С. Ю., Львов Д. С., Фетисов Г. Г. Эволюция технико-экономических систем: возможности и границы централизованного регулирования. М.: Наука, 1992.
12. Richard A. Clarke, Robert K. Knake. Cyberwar. The Next Threat to National Security and What to Do About It. Ecco, HarperCollins, 2010.