

К вопросу о термодинамическом состоянии светодиодов в корпусах светильников из поликарбоната при эксплуатации в условиях животноводческих предприятий.

В предыдущей статье мы рассмотрели вопросы, связанные с измерением рабочей температуры светодиодов в поликарбонатном корпусе светильника. Выяснили, что практические измерения имеют некоторые особенности, существенно влияющие на достоверность результатов замера температуры, и чем, к сожалению, пользуются некоторые производители, чтобы ввести в заблуждение клиента. Сейчас мы произведем расчет температуры внутри поликарбонатного корпуса нескольких светильников на основе законов и формул термодинамики и сравним их с реальными замерами, которые проводила наша компания.

В термодинамике существуют методы расчета теплового потока, в том числе от цилиндрической однородной стенки (Основы теплопередачи. М.А. Михеев, И.М. Михеева, 1977 г. стр.19). Чтобы показать на примере, как должен учитываться теплообмен светодиодного светильника в поликарбонатном корпусе, начну со светильников, выпускаемых нашей компанией для локального освещения бройлерных клеток. На рисунке 1 показаны размеры светильника, а на рисунке 2 его фотография. В данном случае использование цельного поликарбонатного корпуса возможно из-за низкой мощности светильника – 1,2 Вт и достаточных для отвода тепла от светодиодов размеров корпуса. Итак, светильник состоит из светодиодов в количестве 7 шт. (показаны желтым цветом), установленных на алюминиевой плате (зеленый цвет). Плата крепится к стенкам корпуса из поликарбоната (синий цвет) с помощью специальных пазов. Размеры приведены на рис.1 и составляют:

- 1.) Диаметр корпуса - 15 мм, длина – 400 мм;
- 2.) Размер платы: ширина – 11,5 мм, длина -395 мм, толщина – 1 мм;
- 3.) Светодиоды SMD 5050
- 4.) Мощность светильника 1,2 Вт

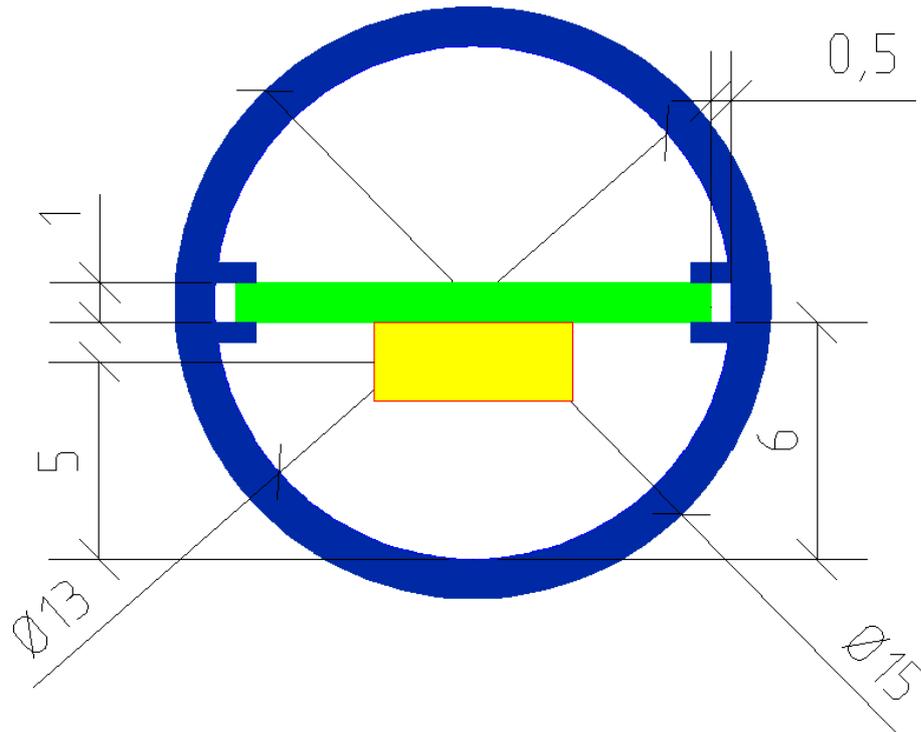


Рис.1 Размеры корпуса светильника для локального освещения, его длина 400 мм



Рис.2 Фотография светодиодного светильника для локального освещения, его длина 400 мм

Согласно условиям эксплуатации нам необходимо определить разницу температур между внешней стенкой поликарбоната и платы со светодиодами внутри светильника. Внешняя стенка корпуса из поликарбоната непосредственно контактирует с воздушной средой гораздо большего объема, чем объем светильников, и которая подвержена движению воздуха, что положительно влияет на эффективность теплообмена. Эти условия не

зависят от производителей светодиодного оборудования и используются нами как исходные условия.

Согласно законам термодинамики между внешней стенкой поликарбоната и платой со светодиодами находятся два слоя вещества, непосредственно сам поликарбонат и слой воздуха. Формула для расчета теплового потока в этом случае (для однородной цилиндрической стенки) выглядит следующим образом:

$$Q = \frac{2\pi\lambda l}{Ln\frac{d2}{d1}} (t1 - t2), \text{ где}$$

Q - тепловой поток в *Ваттах*;

λ - теплопроводность материала, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$;

l – длина цилиндра (длина корпуса), *м*;

$d2$ и $d1$ – диаметры корпуса из поликарбоната соответственно внешний и внутренний, *м*;

$t1$ и $t2$ - температуры внутренней и внешней поверхностей корпуса из поликарбоната, *К* (можно и в шкале Цельсия)

Если необходимо найти температуру внутренней поверхности поликарбонатного корпуса по отношению в температуре внешней поверхности формулу необходимо преобразовать к виду:

$$t1 = t2 + \frac{QLn\frac{d2}{d1}}{2\pi\lambda l},$$

Рассчитаем температуру на внутренней поверхности поликарбонатного корпуса исходя из того, что 70 % мощности расходуется на выделение тепла, температура наружного воздуха +25 °С, теплопроводность поликарбоната $0,31 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$:

$$t1_{\text{п}} = 25 + \frac{0,84 \times Ln\frac{0,015}{0,013}}{2\pi \times 0,31 \times 0,4} = 25 + \frac{0,84 \times Ln\frac{0,015}{0,013}}{2\pi \times 0,31 \times 0,4} = 25 + 0,15 = 25,15^{\circ}\text{C}$$

Итак, температура внутренней стенки поликарбоната практически не отличается от температуры внешней среды, но между платой со светодиодами и внутренней стенкой поликарбоната находится слой воздуха и он существенно меняет картину.

Если для твердых тел основной теплообмен определяется теплопроводностью самого вещества, то для газов и жидкостей необходимо учитывать не только теплопроводность, но и их движение, обусловленное поднятием теплого воздуха вверх и замещением его более холодным (Основы теплопередачи. М.А. Михеев, И.М. Михеева, 1977 г. стр.69). На рисунке 3 показано движение воздуха внутри цилиндрического корпуса светильника.

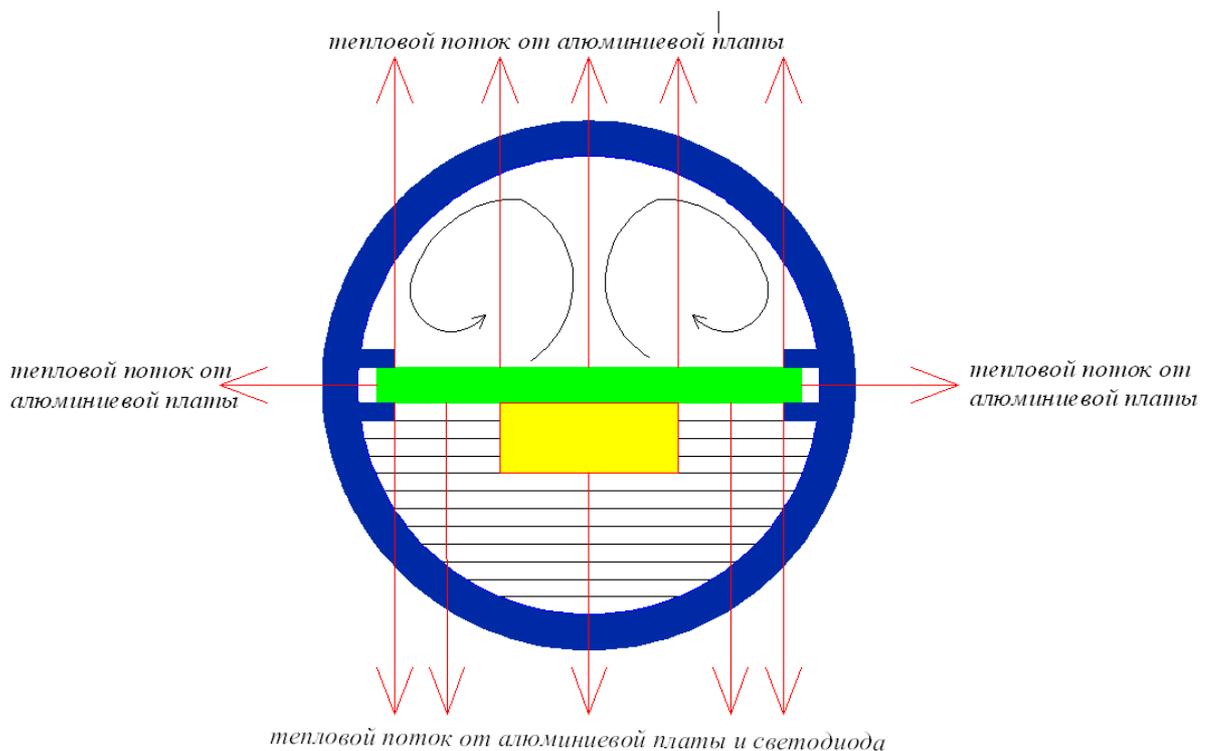


Рис.3 Движение воздуха внутри корпуса светильника. Внизу корпуса воздух неподвижен, так как теплый воздух, нагретый светодиодами, уже находится сверху и создает «воздушную подушку» вокруг светодиодов.

Плата разделяет корпус на две половины, в нижней воздух неподвижен, так как теплый воздух от светодиодов, как источников тепла уже находится сверху, а верхней части, как показано на рисунке он поднимается вверх. Движение воздуха в верхней части незначительно из-за малых объемов корпуса, а в нижней части светодиоды находятся в «воздушной» подушке из нагретого воздуха, что существенно увеличивает температуру корпуса светодиодов. Учет в расчете теплового потока свободной конвекции воздуха

(Основы теплопередачи. М.А. Михеев, И.М. Михеева, 1977 г. стр.94) сложен и основан на опытных данных. Для упрощения расчетов алюминиевую плату со светодиодами будем считать равномерно прогретой (при использовании текстолитовой платы такое допущение не правомерно), тогда ее можно представить в виде модели, которая достаточно точно будет представлять реальный теплообмен внутри светильника. Такой моделью будет цилиндр с площадью равной площади алюминиевой платы. Площадь поверхности алюминиевой платы можно рассчитать, зная ее ширину и длину и учитывая, что она имеет две стороны (делаем допущение, что обе поверхности платы имеют одинаковую теплоотдачу, хотя одна из сторон и покрыта тонким слоем краски):

$$S_{пл} = 0,012 \times 0,395 \times 2 = 0,0095 \text{ м}^2$$

Такой же площадью обладает цилиндр с радиусом (во всех расчетах учитываем только боковую поверхность цилиндров):

$$R_{цп} = \frac{S_{пл}}{2 \times \pi \times l} = \frac{0,0095}{2 \times 3,14 \times 0,4} = 0,0038 \text{ м}$$

Итак, радиус цилиндра равен 3,8 мм, а диаметр 7,6 мм (рис. 4).

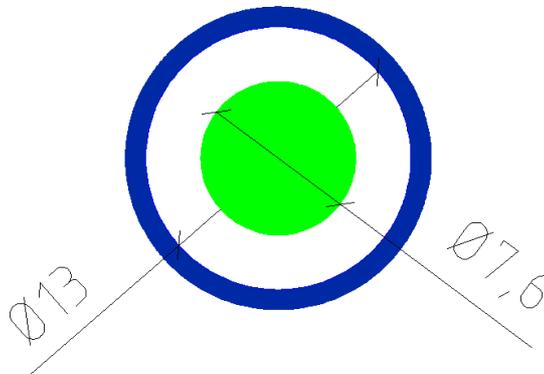


Рис.4 Модель светодиодного светильника. Синий цвет – поликарбонатный корпус, зеленый цвет – плата со светодиодами.

Тогда температуру на поверхности алюминиевой платы со светодиодами с учетом воздушного пространства (теплопроводность воздуха $0,03 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$) внутри светильника можно рассчитать по формуле, указанной выше:

$$t_{1к} = +25,15^\circ\text{C} + \frac{0,84 \times \ln \frac{0,013}{0,0076}}{2\pi \times 0,03 \times 0,4} = 25,15 + \frac{0,84 \times 0,5368}{6,28 \times 0,012} = +25,15 + 6 = +31,15^\circ\text{C}$$

Практические измерения по сравнению влияния корпуса светодиодного светильника, проведенные мной на светильнике СК-400Т, подтверждают результаты расчетов. На рисунке 5 замеры температуры светодиодов при эксплуатации без поликарбонатного корпуса, а на рисунке 6 представлена термограмма сразу после извлечения платы из корпуса (поликарбонат не позволяет замерять температуру внутри корпуса (см. статью на сайте «К вопросу о том, что греется больше: поликарбонат или некоторые головы»)) после 6 часовой работы светильника.

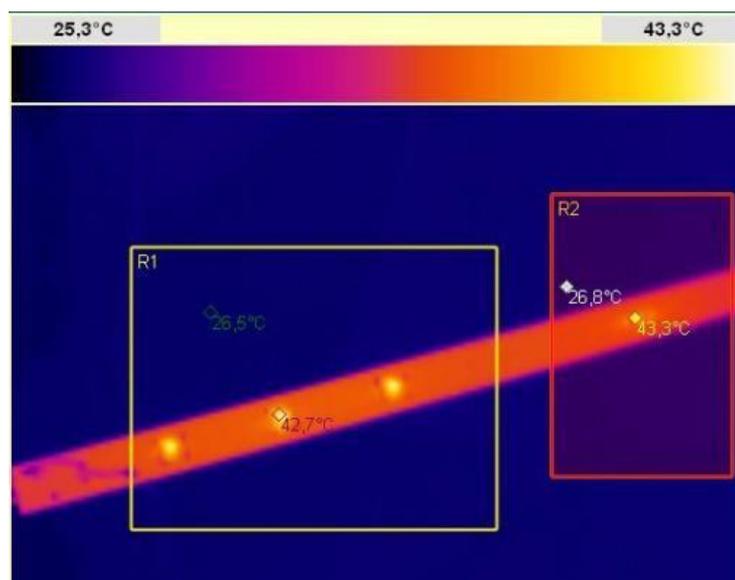


Рис.5 Термограмма платы для светильников локального освещения при эксплуатации без корпуса.

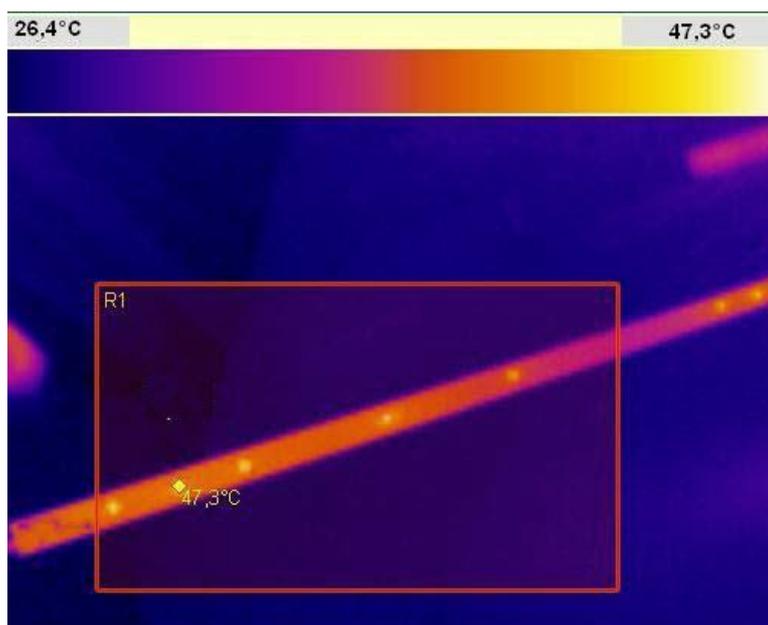


Рис.6 Термограмма платы для светильников локального освещения при эксплуатации в поликарбонатном корпусе.

Эти данные приведены мной в статье «Зависимость срока службы систем светодиодного освещения для животноводческих и птицеводческих предприятий от конструктивных особенностей корпуса светодиодных светильников и обеспечения необходимого теплового режима работы светодиодов» в разделе «Важно знать» на сайте нашей компании.

Как видим, результаты расчетов показывают, что корпус такой конфигурации и размеров дополнительно увеличит температуру платы на 6,15 °С, а реальные замеры показывают температуру на светодиодах +47,3 °С (в поликарбонатном корпусе) и +43,3 °С при эксплуатации без корпуса, разница 4 °С. На основании этого можно сделать вывод, что расчеты, проведенные по формулам термодинамики и с введенными допущениями достоверны и могут использоваться в аналогичных случаях.

Необходимо заметить, что пока мы не учитывали термодинамические характеристики самой **алюминиевой** платы со светодиодами, которые определяют температуру платы и светодиодов при эксплуатации без корпуса, к ним мы вернемся позже, а пока запомним такой параметр, как соотношение выделяемой тепловой энергии и площади платы. В нашем случае он равен:

$$F_{\text{н}} = \frac{Q}{S_{\text{пл}}} = \frac{0,84}{0,0095} = 88,42 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Важным фактором, позволяющим достичь небольших значений температуры светодиодов при эксплуатации в поликарбонатном корпусе является малая мощность светильника. Расчетное увеличение температуры за счет эксплуатации платы со светодиодами в герметичном поликарбонатном корпусе составило +6°С, а температура корпуса светодиода в +47,3°С позволяет прогнозировать его длительную эксплуатацию.

Картина меняется, если мощность светильника возрастает. На одном из сайтов производителя систем освещения для птицеводства приводится пример для светильника собственного производства, при котором для мощности светильника 19,2 Вт площадь поликарбонатного корпуса составляет 628 квадратных сантиметров (0,0628 м²). В этом случае, как утверждается, поликарбонатный корпус «легко» (так сказано на сайте) справляется с обеспечением рассеяния тепловой мощности и температура светодиодов не повышается. На основании предыдущих расчетов и

используя те же самые допущения, произведем расчет. Для начала определим исходные данные. Длину корпуса светильника положим равным 1 метру, тогда радиус корпуса равен:

$$R_{\text{к}} = \frac{S_{\text{к}}}{2 \times \pi \times l} = \frac{0,0628}{2 \times 3,14 \times 1} = 0,01 \text{ м}$$

Тогда диаметр корпуса светильника 20 мм (0,02 м). Мощность теплового потока возьмем с данных на сайте при мощности светильника 19,2 Вт – 13 Вт (что укладывается примерно в 70 % от мощности). Толщина поликарбоната пусть составляет 1,5 мм. Тогда, температура на внутренней поверхности поликарбоната будет равна:

$$t_{1\text{п}} = 25 + \frac{13 \times L_n \frac{0,02}{0,017}}{2\pi \times 0,31 \times 1} = 25 + \frac{13 \times 0,1625}{6,28 \times 0,31} = 25 + 1,08 = 26,08^\circ\text{C}$$

Далее рассчитаем модель алюминиевой платы со светодиодами в виде цилиндра:

$$S_{\text{пл}} = 0,016 \times 1 \times 2 = 0,032 \text{ м}^2$$

$$R_{\text{цп}} = \frac{S_{\text{пл}}}{2 \times \pi \times l} = \frac{0,032}{2 \times 3,14 \times 1} = 0,005 \text{ м}$$

Алюминиевую плату со светодиодами можно представить как цилиндр с радиусом 5 мм и диаметром 10 мм (0,01 м) см. рис.6.

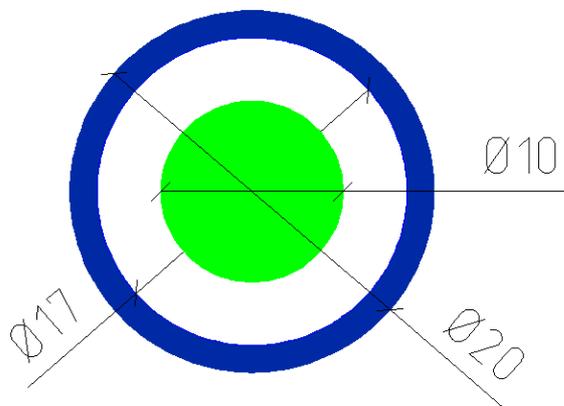


Рис.6 Модель светодиодного светильника. Синий цвет – поликарбонатный корпус, зеленый цвет – плата со светодиодами.

Тогда температуру на поверхности алюминиевой платы со светодиодами с учетом воздушного пространства (теплопроводность воздуха $0,03 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$) внутри светильника можно рассчитать по формуле, указанной выше:

$$t_{1к} = +26,08^{\circ}\text{C} + \frac{13 \times \text{Ln} \frac{0,017}{0,01}}{2\pi \times 0,03 \times 1} = 26,08 + \frac{13 \times 0,5306}{6,28 \times 0,03} = +26,08 + 36,61 = +62,69^{\circ}\text{C}$$

Таким образом, при увеличении мощности и размеров светильника как указано на сайте одного из производителей систем освещения разница температур алюминиевой платы по отношению к окружающей среде ($+25^{\circ}\text{C}$) в сравнении с нашим светильником возрастет в шесть раз и составит не $+31,15^{\circ}\text{C}$, а $+62,69^{\circ}\text{C}$. При больших температурах, например, во время мойки оборудования, когда температуру в птичнике поднимают до $+50^{\circ}\text{C}$ и более на достаточно продолжительное время, а также в южных регионах, когда из-за высокой температуры на улице летом, температура воздуха вверху под крышей может достигать таких же значений, температура алюминиевой платы (не светодиодов, где она будет выше) будет приближаться к диапазону $+90^{\circ}\text{C}$ - $+95^{\circ}\text{C}$, что уже существенно влияет на срок службы светодиодов.

Дальше можно качественно оценить нагрев самой алюминиевой платы. Для нашего светильника СК-400Т отношение мощности теплового потока, как рассмотрено выше составляет - $88,42 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, для алюминиевой платы другого производителя светильников:

$$F_{\text{д}} = \frac{Q}{S_{\text{пл}}} = \frac{13 \text{ Вт}}{0,032 \text{ м}^2} = 406,25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Таким образом, плотность мощности теплового потока почти в пять раз выше, чем у нашей платы, поэтому и температура самой алюминиевой платы даже без корпуса при такой мощности будет гораздо выше.

Произведем расчет еще для одного варианта светильников в поликарбонатном корпусе диаметром 40 мм толщиной 2 мм и длиной 0,4 м, когда мощность светильника составляет 4 Вт см. рис.7.

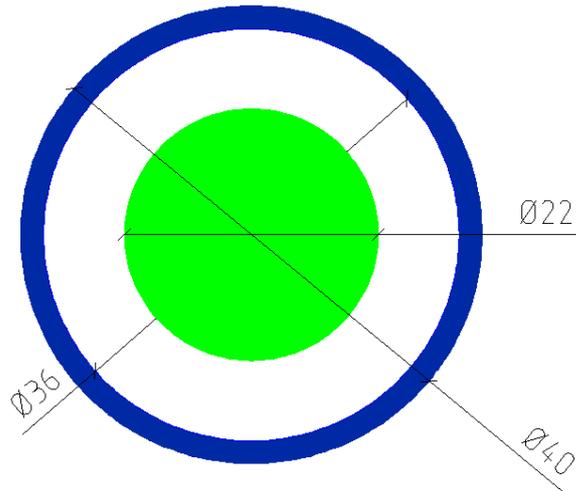


Рис.7 Модель светодиодного светильника. Синий цвет – поликарбонатный корпус, зеленый цвет – плата со светодиодами

Температура на внутренней поверхности поликарбонатного корпуса будет равна:

$$t_{1п} = 25 + \frac{2,8 \times \text{Ln} \frac{0,04}{0,036}}{2\pi \times 0,31 \times 0,4} = 25 + \frac{2,8 \times 0,1053}{6,28 \times 0,124} = 25 + 0,37 = 25,37^\circ\text{C}$$

Площадь алюминиевой платы:

$$S_{пл} = 0,035 \times 0,4 \times 2 = 0,028 \text{ м}^2$$

$$R_{цп} = \frac{S_{пл}}{2 \times \pi \times l} = \frac{0,028}{2 \times 3,14 \times 0,4} = 0,011 \text{ м}$$

Температура на поверхности алюминиевой платы:

$$t_{1к} = +25,37^\circ\text{C} + \frac{2,8 \times \text{Ln} \frac{0,036}{0,022}}{2\pi \times 0,03 \times 0,4} = 25,37 + \frac{2,8 \times 0,4925}{6,28 \times 0,012} = +25,37 + 18,4 = +43,77^\circ\text{C}$$

Хотя в этом случае, влияние свободной конвекции воздуха возрастает, необходимо помнить, что светодиоды на плате при эксплуатации светильников находятся в области неподвижного воздуха (рис.3), что ухудшает теплообмен. **(Мой совет конкурентам – делайте отверстия в плате)**. Плотность теплового потока для этого варианта:

$$F_d = \frac{Q}{S_{пл}} = \frac{2,8 \text{ Вт}}{0,028 \text{ м}^2} = 100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Ну, а теперь расчетные зависимости срока службы светодиодов. Для светодиодов «SAMSUNG» данные производителя светодиодов на рис.8

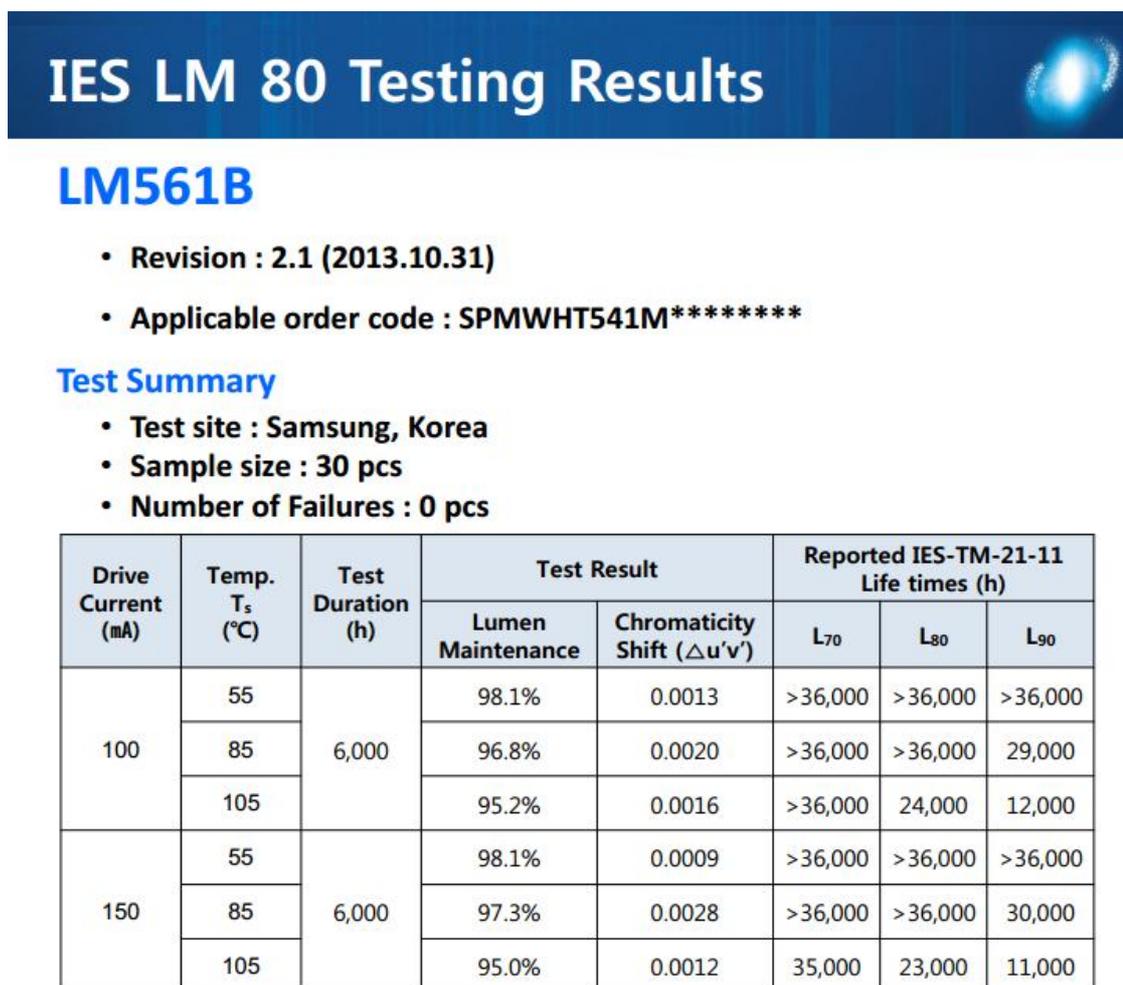


Рис.8 Зависимость падения светового потока от температуры для светодиода LM561B.

Для тока 100 mA при эксплуатации его при температуре +85° C падение светового потока до уровня 90 % от начальной наступит через 29 000 часов, а при +105 ° C через 12 000 часов (почти в 2,5 раза быстрее). 12 000 часов это примерно 1,4 года непрерывной эксплуатации. Для нашего светильника СК-400Т по результатам расчетов и замеров можно применить строчку с температурой +55 ° C согласно которой падение светового потока до 90 % от начальной наступит более, чем через 36 000 часов.

Конечно, это расчетные данные и реальная эксплуатация должна учитывать множество других факторов, но вывод, который я хотел бы сделать на основании этой статьи:

Поликарбонатный корпус всегда ухудшает теплообмен светодиодного светильника и сокращает срок его службы. Это сокращение срока эксплуатации светодиодов сильно возрастает при увеличении мощности светильников при фиксированных размерах корпуса. Поэтому, я с самого начала разработки и выпуска нашей компанией светодиодных светильников делал ставку на использование алюминиевого радиатора, имеющего непосредственный контакт с окружающим воздухом. Этот принцип дает и существенный экономический эффект при разработке мощных светильников. Основная цель использования алюминиевого радиатора – исключить в среде между светодиодом и внешней средой влияние на тепловой обмен материалов с низкой теплопроводностью, таких как воздух и поликарбонат.

Успешность этих решений лучше всего подтверждает референция наших поставок (<http://www.ntp-ts.ru/projects.php>), в соответствии с которой нашим оборудованием укомплектовано почти 1000 корпусов животноводческих предприятий, на которых установлено более 400 000 светильников. Некоторые из них успешно эксплуатируются более 5 лет (например, ГАП «Ресурс»).

Расчет теплового обмена для светильников с алюминиевым радиатором в составе корпуса светильника, я представлю в следующей части статьи, так же будет рассмотрен вопрос теплового обмена между светодиодами и алюминиевой платой.

Технический директор ООО «Техносвет групп»

Дмитрий Гладин