

УДК 628.932

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДУЛЯ СВЕТОДИОДНОГО ПОДСВЕТА

© 2018 Д.В. Харькин, И.П. Ефимов, Д.Ш. Алимова, Д.А. Цыганов

Ульяновское конструкторское бюро приборостроения

Статья поступила в редакцию 05.06.2018

В статье рассматриваются вопросы выбора типа светодиодного подсвета жидкокристаллических панелей на базе белых светодиодов. Рассмотрено применение различных типов светодиодных подсветов в зависимости от типоразмера жидкокристаллической панели с учетом световой эффективности. Полученные математические модели и алгоритмы позволяют автоматизировать процесс выбора типа светодиодного подсвета и разработки светодиодных подсветов с прогнозируемыми светотехническими характеристиками. Появляется возможность оперативно подобрать элементы для светодиодного подсвета с требуемыми конструктивными параметрами для конкретного типоразмера жидкокристаллической панели на первоначальном этапе разработки.

**Ключевые слова:** математическая модель, моделирование, светодиодный подсвет, световод, рассеиватель, фронтальный подсвет, торцевой подсвет.

### ВВЕДЕНИЕ

Большинство современных систем автоматизированного управления технологическими процессами имеют в своем составе средства отображения информации. На указанные средства отображения информации выводится чаще всего оперативная информация в виде мнемосхем, трендов, таблиц. В настоящее время значительное распространение среди таких устройств отображения информации получили жидкокристаллические дисплеи (ЖК-дисплеи), которые обладают существенными преимуществами (масса, габариты, потребляемая мощность, цена) по сравнению с другими дисплеями. Основной проблемой при разработке и изготовлении ЖК-дисплеев является обеспечение требуемых светотехнических параметров и характеристик [1]. Одни из наиболее важных светотехнических параметров – это яркость и равномерность яркости по всему полю экрана.

Первый массовый выпуск мониторов на базе цветных, активно матричных ЖК-дисплеев,

Харькин Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ, начальник научно-исследовательского отдела АО «УКБП». E-mail: hardim@mail.ru

Ефимов Иван Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ. E-mail: eip@ulstu.ru

Алимова Динара Шаукатовна, аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ, начальник комплексной тематической бригады научно-исследовательского отдела АО «УКБП».

E-mail: dinalimova@icloud.com

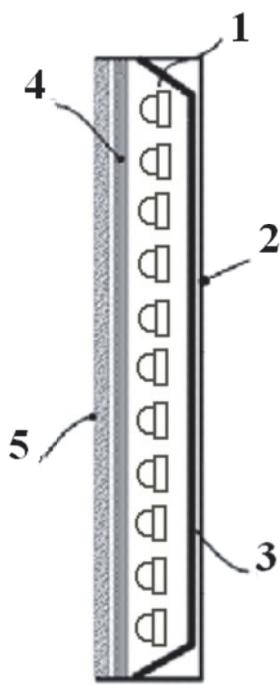
Цыганов Дмитрий Александрович, аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ, ведущий инженер-исследователь научно-исследовательского отдела АО «УКБП».

имеющих достаточно посредственные светотехнические характеристики (яркость, равномерность, контраст при крайних углах обзора, быстродействие) начался в 1980-х годах. В дальнейшем технологии были улучшены и к 1992 году активно-матричные ЖК-дисплеи превзошли ЭЛТ по их использованию в авиационной технике и в промышленных системах контроля и управления. Их надежность оказалась выше в 30 раз [2].

На сегодняшний день ЖК-дисплеи успешно конкурируют с другими средствами отображения информации. При этом ЖК-дисплеи не обладают способностью к свечению. Принцип их работы основан на пропускании поляризованного света определенных длин волн за счет поворота жидких кристаллов под действием электрического поля. Поэтому одной из важнейших задач при разработке и изготовлении ЖК-дисплеев в коммерческой технике и особенно в индустриальных системах управления является разработка узлов подсвета ЖК-дисплеев с высокими показателями яркости и ее равномерности. В настоящее время в качестве источника света в ЖК-дисплеях используются преимущественно светодиоды [3, 4]. При этом наиболее часто применяются белые светодиоды [5, 6]. Существуют два основных варианта построения светодиодного подсвета: фронтальный подсвет и торцевой подсвет.

В первых ЖК-дисплеях модули подсвета конструктивно представляли собой фронтальный подсвет, т.е. необходимое для достижения требуемой яркости количество люминесцентных ламп располагались непосредственно за ЖК-дисплеем. Требуемая равномерность достигалась за счет плотного диффузного рассеивателя, с коэффициентом пропускания примерно

равным 50 %. Типовая конструкция фронтального подсвета показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Типовая конструкция фронтального подсвета:

1 – светодиоды; 2 – корпус; 3 – отражатель; 4 – рассеиватель; 5 – жидкокристаллическая панель

С развитием программ светотехнического моделирования появилась возможность проектирования модулей подсвета с использованием световодов. Световоды представляют собой прозрачные стеклянные или органические пластины с нанесенными на заднюю поверхность «дотами» – матированными площадками различной формы или элементы в виде вогнутых линз круглой или квадратной формы. Расположение или размер

«дотов» рассчитывался с помощью специальной программы светотехнического моделирования. При этом, чем больше площадь «дотов» на единицу площади основания световода, тем больший световой поток направляется в противоположную сторону. Основной принцип при проектировании световодов: чем дальше от источника света точка световода тем больше должна быть площадь «дотов» на единицу поверхности световода (рис. 2).

Подсветы ЖК-дисплеев с использованием световодов называются торцевыми подсветами из-за характерного расположения источника света относительно ЖК-дисплея. При применении торцевого подсвета ЖК-дисплею необходим диффузный рассеиватель с небольшой плотностью около 90 %. Типовая конструкция жидкокристаллического модуля (ЖК-модуля) с торцевым подсветом показана на рис. 3.

После появления на рынке сверхярких светодиодов, светодиоды начали применяться в обоих вариантах модулей подсвета [7].

При этом фронтальный и торцевой подсветы имеют свои достоинства и недостатки.

Достоинства фронтального типа подсвета:

- отсутствие необходимости проведения светотехнического моделирования при проектировании элементов конструкции и относительная ее простота;

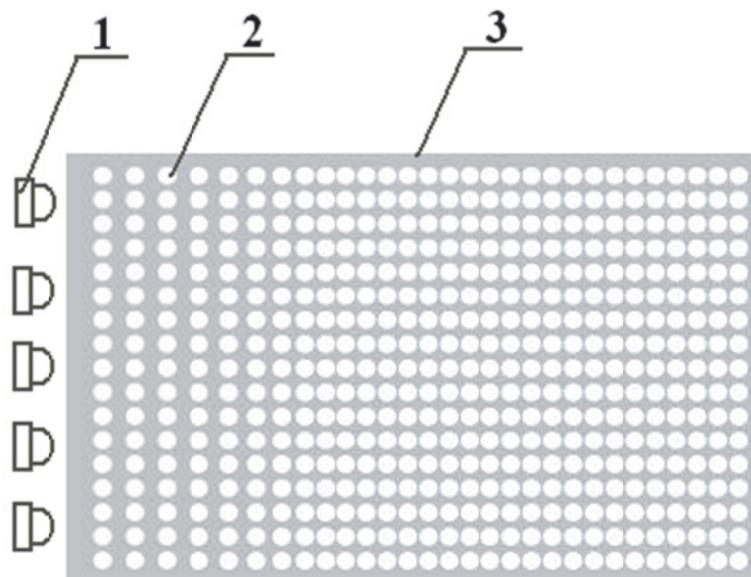
- возможность реализации динамического контраста за счет отключения подсветки в темных зонах изображения;

- возможность применения в больших типоразмерах (более 17").

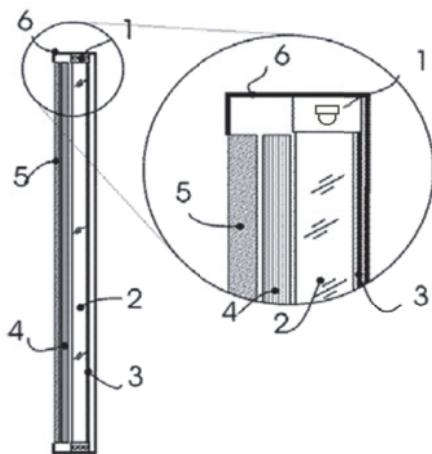
Недостатки фронтального типа подсвета:

- большее количество светодиодов по сравнению с торцевым подсветом, как следствие более низкая надежность и высокая стоимость;

- сложная схема управления питанием;



**Рис. 2.** Вид световода для одностороннего расположения источника света  
1 – светодиоды; 2 – «доты»; 3 – световод



**Рис. 3.** Типовая конструкция ЖК-модуля с торцевым подсветом:

1 – светодиоды; 2 – световод; 3 – отражатель; 4 – рассеиватель; 5 – ЖК-дисплей; 6 – корпус

– большие габариты.

Достоинства торцевого типа подсвета:

- малые габариты;
- низкая стоимость;
- более высокая надежность по сравнению с

фронтальным подсветом;

- меньшее количество светодиодов;
- более простая схема управления питанием.

Недостатки торцевого типа подсвета:

- необходимость проведения светотехнического моделирования при проектировании элементов конструкции (световодов);
- невозможность реализации динамического контраста за счет отключения подсветки в темных зонах изображения;
- сложности применения в больших типоразмерах (более 17").

Как видно из приведенных достоинств и недостатков фронтального и торцевого подсветов недостатки одного типа подсветы являются достоинствами другого типа и наоборот.

В настоящее время торцевой и фронтальный подсветы широко используются в ЖК-дисплеях. При этом размеры ЖК-дисплеев с каждым годом увеличиваются, соответственно растет потребляемая мощность. Коэффициент полезного действия светодиодного подсвета определяется световой эффективностью. Световая эффективность оптического излучения (иногда называемая функцией яркости или люмен-эквивалентом), измеряемая в люменах на ватт оптической мощности, представляет собой коэффициент преобразования оптической мощности в световой поток [3]. Построение математических моделей и автоматизация процесса выбора типа светодиодного подсвета для обеспечения максимальной световой эффективности и равномерности свечения является важной научно-технической задачей.

## ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СВЕТОДИОДНОГО ПОДСВЕТА

Неравномерность яркости по полю экрана определяется по формуле:

$$N = \frac{|L_{MAX} - L_{MIN}|}{L_{MAX}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $L_{MAX}$  – точка на экране с максимальной яркостью,

$L_{MIN}$  – точка на экране с минимальной яркостью.

Распределение яркости по ЖК-дисплею зависит в основном от конструкции подсвета.

В случае с фронтальным подсветом, распределение яркости складывается из двух составляющих:

- неравномерность яркости создаваемая взаимным расположением светодиодов (количество светодиодов и расстояния между ними);
- многократное диффузное переотражение света от внутренних поверхностей подсвета.

Светодиоды, применяемые в качестве источника подсветы ЖК-дисплеев излучают свет в одно полушарие с определенной диаграммой направленности. Поэтому неравномерность будет, в основном, определяться первой составляющей. Диаграмма распределения световой интенсивности для широкогольных светодиодов показана на рис. 4.

Типовое схематичное расположение светодиодов во фронтальном подсвете показано на рис. 5.

В этом случае неравномерность яркости будет определяться [8]:

$$N \approx \frac{E_{MAX\_eff} - E_{MIN\_eff}}{E_{MAX\_eff}}, \quad (2)$$

где  $E_{MAX\_eff}$  – максимальная эффективная освещенность создаваемая светодиодами,

$E_{MIN\_eff}$  – минимальная эффективная освещенность, создаваемая светодиодами.

Освещенность в точке с координатами  $x, y$  с толщиной подсвета  $z$  определяется как:

$$E(x, y, z)_{eff} = E(x, y, z) + R_p \cdot (1 - T_R) \cdot E_B, \quad (3)$$

где  $R_p$  – коэффициент отражения поверхности;

$T_R$  – коэффициент пропускания рассеивателя.

$E_B$  – фоновая освещенность создаваемая в фронтальном подсвете, которая определяется по формуле:

$$E_B = (n \cdot \int I d\Omega) / A_{light},$$

где  $n$  – количество светодиодов;

$I$  – нормализованная диаграмма силы света светодиода;

$\Omega$  – телесный угол светодиода;

$A_{light}$  – площадь светодиодного подсвета.

Для прямоугольной матрицы светодиодов приведенная освещенность в точках с максимальным отличием по яркости ( $E(0,0,z)$ ,  $E(0,0.5d,z)$ ,  $E(0.5d,0,z)$ ,  $E(0.5d,0.5d,z)$ ) будет равна:

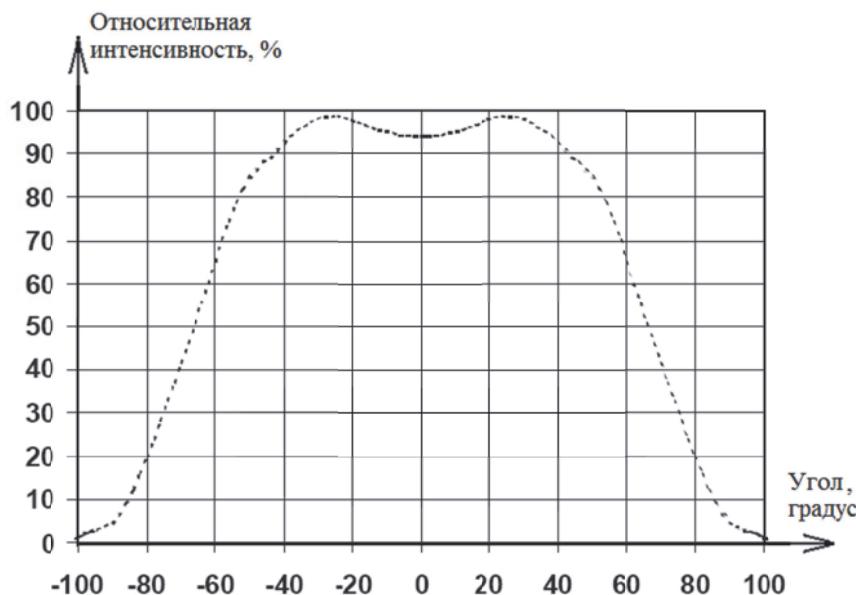


Рис. 4. Диаграмма распределения световой интенсивности для широкоугольных светодиодов

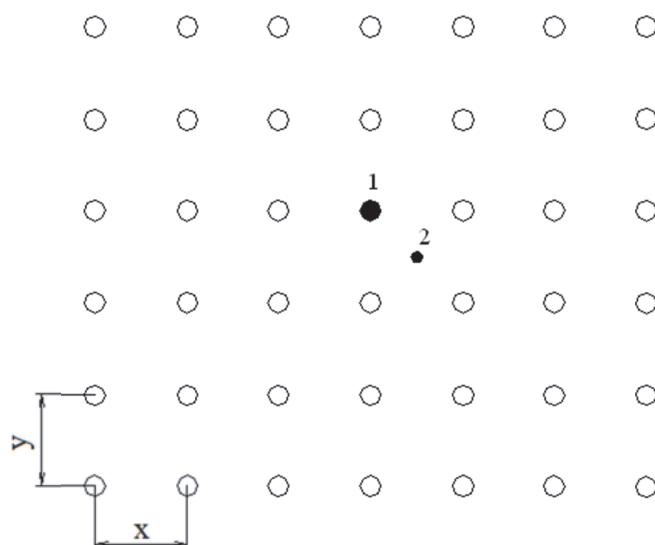


Рис. 5. Схематичное расположение светодиодов:  
1 – светодиод; 2 – точка между светодиодами

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y \frac{z^2}{[(x - (X + 1 - 2i)d/2)^2 + (y - (Y + 1 - 2j)d/2)^2 + z^2]^2}, \quad (4)$$

где  $d$  – расстояние между светодиодами;  
 $z$  – расстояние от светодиода до рассеивателя;  
 $i, j$  – позиция светодиода в матрице;  
 $X, Y$  – количество светодиодов в матрице по осям  $x, y$ .

Минимальное расстояние от светодиода до поверхности рассеивателя выбирается таким образом, чтобы световой поток двух соседних светодиодов пересекался между собой по уровню, не менее 0,5 от максимальной интенсивности излучения (рис. 6). Большее расстояние потребует использование рассеивателя с большим коэффициентом рассеивания и соответственно

с более низким коэффициентом пропускания, и приведет к снижению световой эффективности.

Световая эффективность модуля светодиодного подсвета рассчитывается по формуле:

$$\gamma_{\text{МСП}} = \frac{F_{\text{МСП}}}{U_c \cdot I_c \cdot N}, \quad (5)$$

где  $F_{\text{МСП}}$  – световой поток светодиодного подсвета;  
 $U_c$  – прямое падение напряжение светодиода;  
 $I_c$  – прямой ток через светодиод;  
 $N$  – количество светодиодов в светодиодном подсвете.

При проведении светотехнических расчетов автоматизированным способом, с помощью программ светотехнического моделирования, используется математическая модель, базирую-

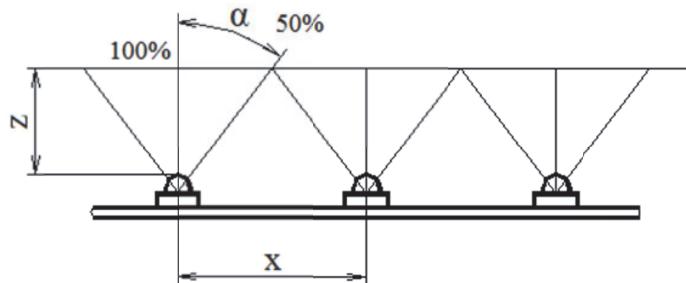


Рис. 6. Расположение светодиодов с диаграммой распределения интенсивности

ющаяся на методе Монте-Карло (лучевой метод трассировки линий распространения света). В светодиодных подсветах используется некогерентное излучение и геометрические размеры деталей, оказывающих влияние на свет, как правило, значительно больше длины волны видимого излучения. Поэтому такие явления как интерференция и дифракция не оказывают значительного влияния на распределение яркости.

При автоматизированных расчетах используется следующая основная формула:

$$L(\vec{p}, \vec{\gamma}, c) = \tau(\vec{p}, \vec{\gamma}, c) \left[ L_0(\vec{p}, \vec{\gamma}, c) + \frac{1}{\pi \cdot N} \sum_{i=1}^N BSDF(\vec{p}, \vec{\gamma}, \vec{\gamma}', c) \cdot E_i(\vec{p}, \vec{\gamma}, \vec{\gamma}', c) \right], \quad (6)$$

где  $L_0(\vec{p}, \vec{\gamma}, c)$  – собственная яркость объекта в точке наблюдения  $\vec{p}$ , направлении наблюдения  $\vec{\gamma}$  и для компоненты цвета  $c$ ;

$\tau(\vec{p}, \vec{\gamma}, c)$  – пропускание (прозрачность) среды между наблюдателем и точкой наблюдения;

$BSDF(\vec{p}, \vec{\gamma}, \vec{\gamma}', c)$  – двунаправленная функция рассеивания поверхности от источника освещения по направлению  $\vec{\gamma}'$  и в направлении  $\vec{\gamma}$  на наблюдателя, определяемая как

$$BSDF(\vec{p}, \vec{\gamma}, \vec{\gamma}', c) = \frac{dL(\vec{p}, \vec{\gamma}, c)}{dE(\vec{p}, \vec{\gamma}, c)}, \quad (7)$$

где  $E_i(\vec{p}, \vec{\gamma}, \vec{\gamma}', c)$  – локальная освещенность объекта в точке наблюдения по направлению  $\vec{\gamma}'$ , созданная  $i$ -м лучом;

$N$  – количество лучей, участвующих в интегрировании.

Для получения результата моделирования освещенности интенсивности или светового потока вычисленное значение яркости необходимо проинтегрировать.

$$E(\vec{p}, c) = \int_{2\pi} L(\vec{p}, \vec{\gamma}, c) d\omega; \quad (8)$$

$$I(\vec{\gamma}, c) = \int_S L(\vec{p}, \vec{\gamma}, c) ds; \quad (9)$$

$$F(c) = \int_S \int_{2\pi} L(\vec{p}, \vec{\gamma}, c) ds d\omega, \quad (10)$$

где  $S$  – область вычисления интенсивности или потока излучения.

При проведении расчетов с помощью аналитического метода возможен расчет, в основном, для фронтального подсвета. Для торцевого подсвета аналитический расчет представляет собой достаточно трудоемкую задачу или должен опираться на экспериментальные данные с полученными эмпирическими коэффициентами.

В дальнейшем, для получения корелируемых результатов расчетов и возможности сравнения эффективности фронтального и торцевого подсветов моделирование будет проведено с помощью программы светотехнического моделирования TracePro. Данная программа использует при расчетах трассировку световых лучей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФРONTАЛЬНОГО И ТОРЦЕВЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ПОДСВЕТОВ

При проведении моделирования использовались общие для всех расчетов исходные данные:

- светодиод LXML-PWC1-0100, имеющий световой поток 30 Лм при токе 0,11 А;
- неравномерность яркости, не более 25 %;
- ток через светодиоды в соответствии с реальным образцом модуля светодиодного подсвета.

В фронтальных подсветах используется конструктивное расположение светодиодов в подсвете, имеющее периодический характер. Поэтому эффективность фронтального подсвета не зависит от типоразмера подсвета. При расчете фронтального подсвета использовались следующие исходные данные:

- коэффициент пропускания рассеивателя 50 %;
- количество светодиодов 36 шт.;
- расстояние от светодиодов до рассеивателя 50 мм.

При этом получены следующие результаты:

- яркость:  $L = 11\ 150 \text{ кд}/\text{м}^2$ ;
- неравномерность яркости:  $N = 13 \%$ ;
- световая эффективность:  $\gamma = 29 \text{ Лм}/\text{Вт}$ .

Результаты светотехнического моделирования фронтального модуля светодиодного подсвета в программе TracePro показаны на рис. 7. В верхней части рисунка 7 показано распределение яркости по плоскости световода, по оси X (длина световода) и по оси Y (ширина световода). В нижней части рис. 7 показано изменение яркости по осевым линиям световода: по гори-

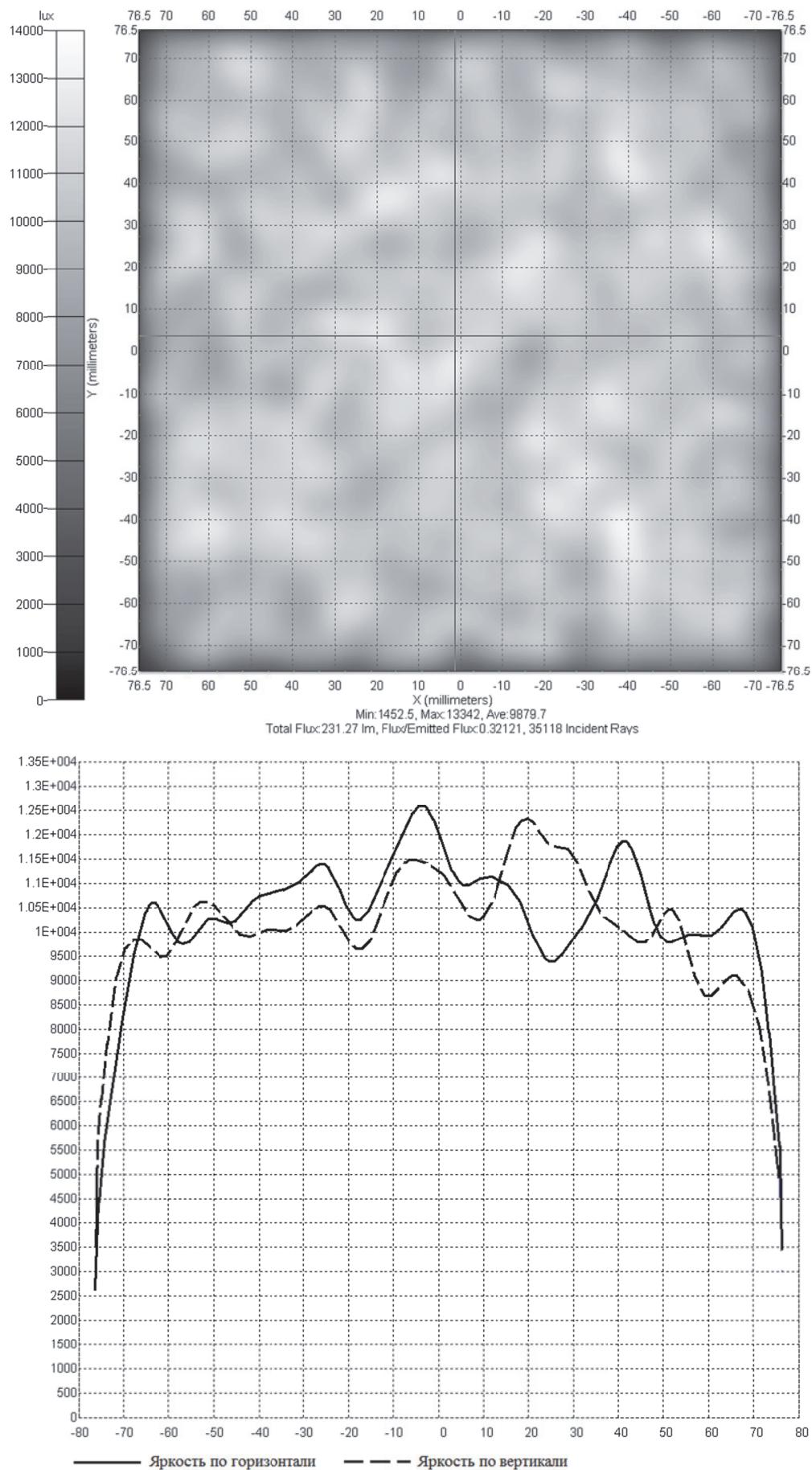


Рис. 7. Результат моделирования фронтального модуля светодиодного подсвета

**Таблица 1.** Сравнение рассчитанных и измеренных светотехнических характеристик светодиодного подсвета

Вид данных	Яркость, кд/м <sup>2</sup>	Неравномерность яркости, %	Световая эффективность, Лм/Вт
Расчет	11 150	12	29
Модуль МЖКЭ-3-1	11 478	10	27

зонтами и вертикали. Незначительное изменение градаций изображения верхней части рис. 7 показывает высокую степень равномерности яркости подсвета. Для наглядности на рис. 8 показан результат моделирования фронтального модуля светодиодного подсвета с расстоянием от светодиодов до рассеивателя 25 мм. На рис. 8 явно видны локальные «яркие» области соответствующие светодиодам, расположенным за рассеивателем.

Сравнение рассчитанных и измеренных светотехнических характеристик приведено в табл. 1

Экспериментальные значения световых характеристик модуля МЖКЭ-3-1 были получены с помощью аттестованного измерительного спектрорадиометра CS-1000A.

Как видно из табл. 1, светотехнические характеристики: яркость, неравномерность яркости, световая эффективность рассчитанного модуля соответствуют характеристикам изме-

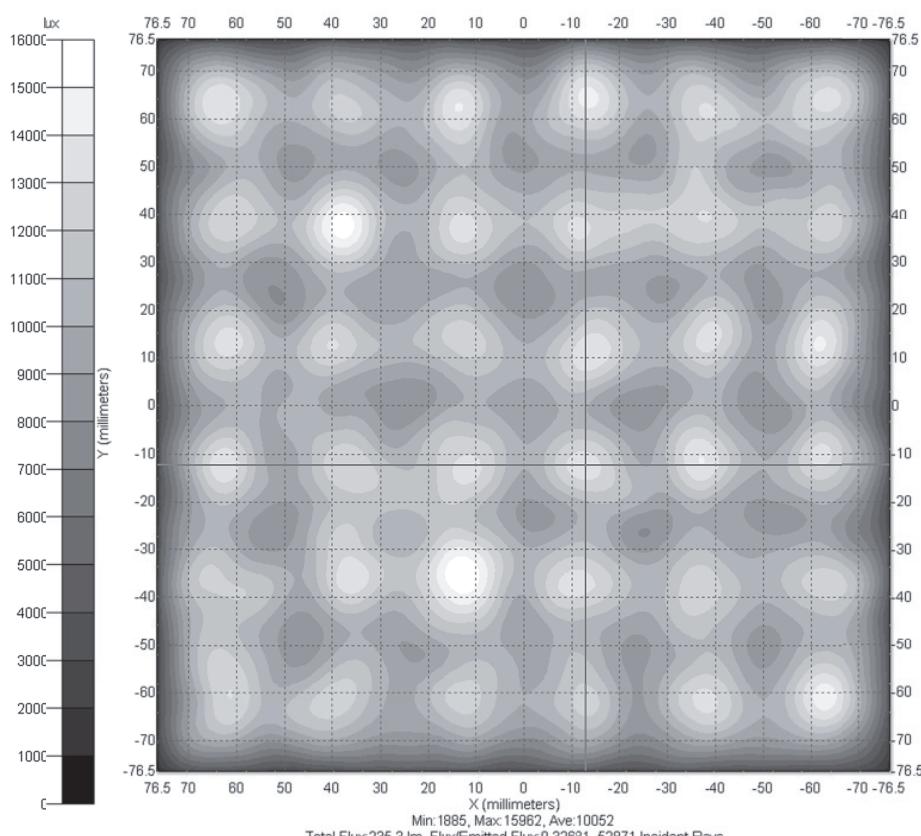
ренного модуля. Расхождение в значениях параметров незначительны.

При проведении моделирования и расчетов торцевых подсветов использовались исходные данные, приведенные в табл. 2

Результаты светотехнического моделирования одного из торцевых модулей светодиодного подсвета 12" x 9" в программе TracePro показаны на рис. 9. В верхней части рис. 9 показано распределение яркости по плоскости световода, по оси X (длина световода) и по оси Y (ширина световода). В нижней части рис. 9 показано изменение яркости по осевым линиям световода; по горизонтали и вертикали.

По результатам проведенного моделирования и расчетов торцевых светодиодных подсветов получены результаты, приведенные в табл. 3.

Сравнение характеристик рассчитанных и измеренных торцевых светодиодных подсветов приведены в табл. 4



**Рис. 8.** Результат моделирования фронтального модуля светодиодного подсвета

**Таблица 2.** Исходные данные для моделирования и расчетов торцевых подсветов

Типоразмер модуля светодиодного подсвета	Количество светодиодов	Коэффициент пропускания рассеивателя, %	Материал световода (коэффициент пропускания, %)
4,57" x 3,43" (5,7" по диагонали)	24	90	CO-120 (0,95 на 10 см)
5" x 4" (6,5" по диагонали)	26		
6" x 8" (10,4" по диагонали)	42		
9" x 7" (12" по диагонали)	50		
12" x 9" (15" по диагонали)	62		

**Таблица 3.** Результаты моделирования и расчетов торцевых светодиодных подсветов

Типоразмер модуля светодиодного подсвета	Яркость, кд/м <sup>2</sup>	Неравномерность, %	Световая эффективность, Лм/Вт
4,57" x 3,43" (5,7" по диагонали)	11 600	12	33,7
5" x 4" (6,5" по диагонали)	22 000	12	33,4
6" x 8" (10,4" по диагонали)	16 200	12	32,9
9" x 7" (12" по диагонали)	9000	12	31,9
12" x 9" (15" по диагонали)	9000	13	29,7

**Таблица 4.** Сравнение характеристик рассчитанных и измеренных торцевых светодиодных подсветов

Модуль светодиодного подсвета	Яркость, кд/м <sup>2</sup>	Неравномерность, %	Световая эффективность, Лм/Вт
4,57" x 3,43"/NL6448BC18	11 600/11 500	12/-	33,7/35
5" x 4" /МДЦ-21	22 000/21 683	12/14	33,4/33
6" x 8" /МДЦ-14	16200/16000	12/14	32,9/32

Экспериментальные значения световых характеристик модулей были получены с помощью аттестованного измерительного спектрорадиометра CS-1000A.

Как видно из табл. 4 светотехнические характеристики: яркость, неравномерность яркости, световая эффективность рассчитанных модулей соответствуют характеристикам измеренных модулей. Расхождение в значениях параметров незначительны. Более высокая неравномерность яркости фактически изготовленного светодиодного подсвета указывает на технологические отклонения, допущенные при изготовлении «дотов» световода.

По результатам проведенного светотехнического моделирования и расчетов световой эффективности торцевых подсветов была построена зависимость световой эффективности индикатора от его типоразмера (рис. 10).

Из рассмотрения графика следует, что при увеличении типоразмера ЖК-дисплея уменьшается и световая эффективность торцевого светодиодного подсвета. При этом по результатам светотехнического моделирования можно сделать вывод, что при разработке светодиодного подсвета, для достижения максимальной световой эффективности, при

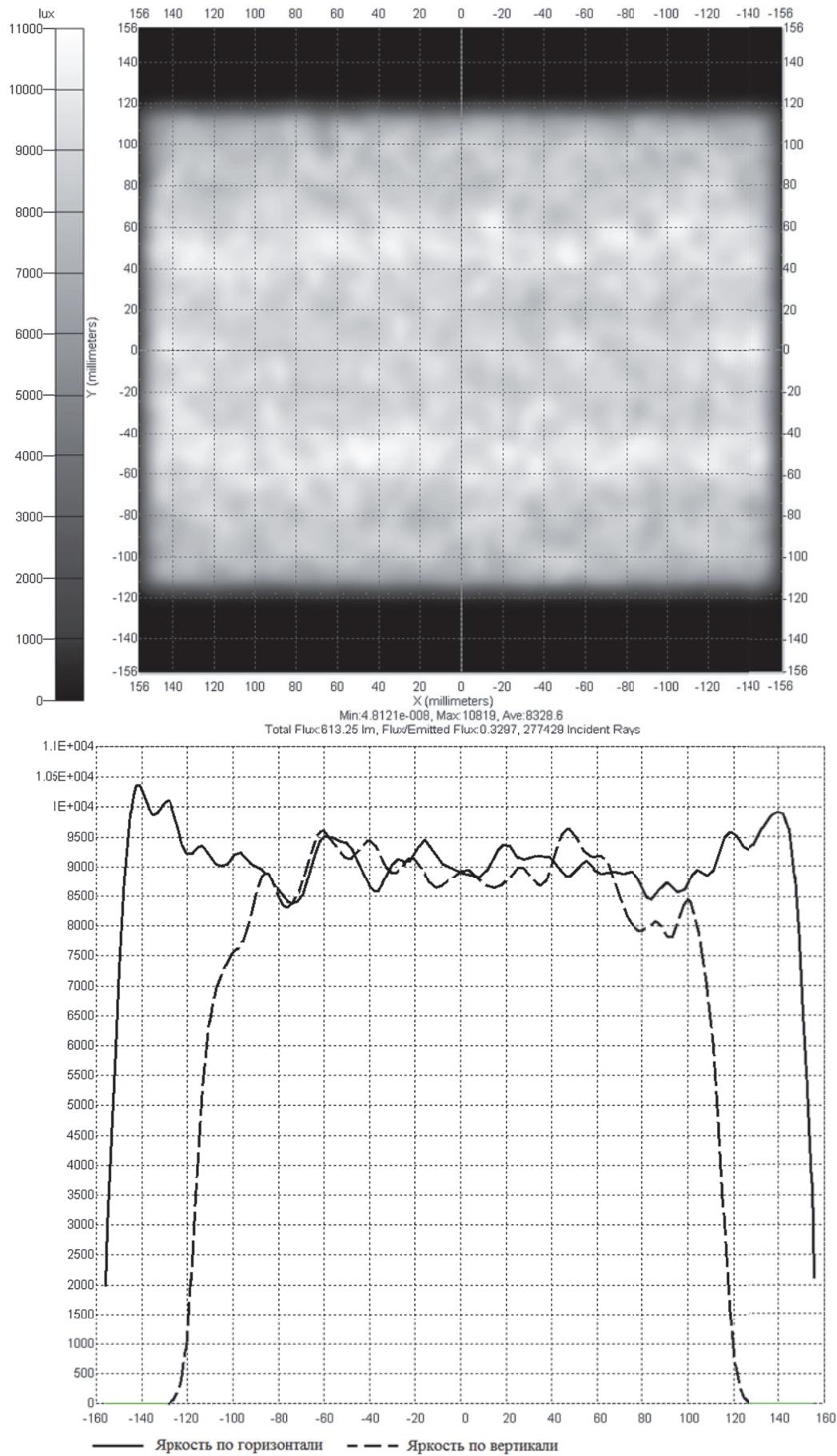
размерах жидкокристаллических панелей 12" x 9" (до 15,1" по диагонали) включительно, необходимо применять торцевой подсвет. При дальнейшем увеличении размеров ЖК-дисплеев наиболее эффективно применять фронтальный светодиодный подсвет. При этом в торцевом подсвете достигается более высокая равномерность яркости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

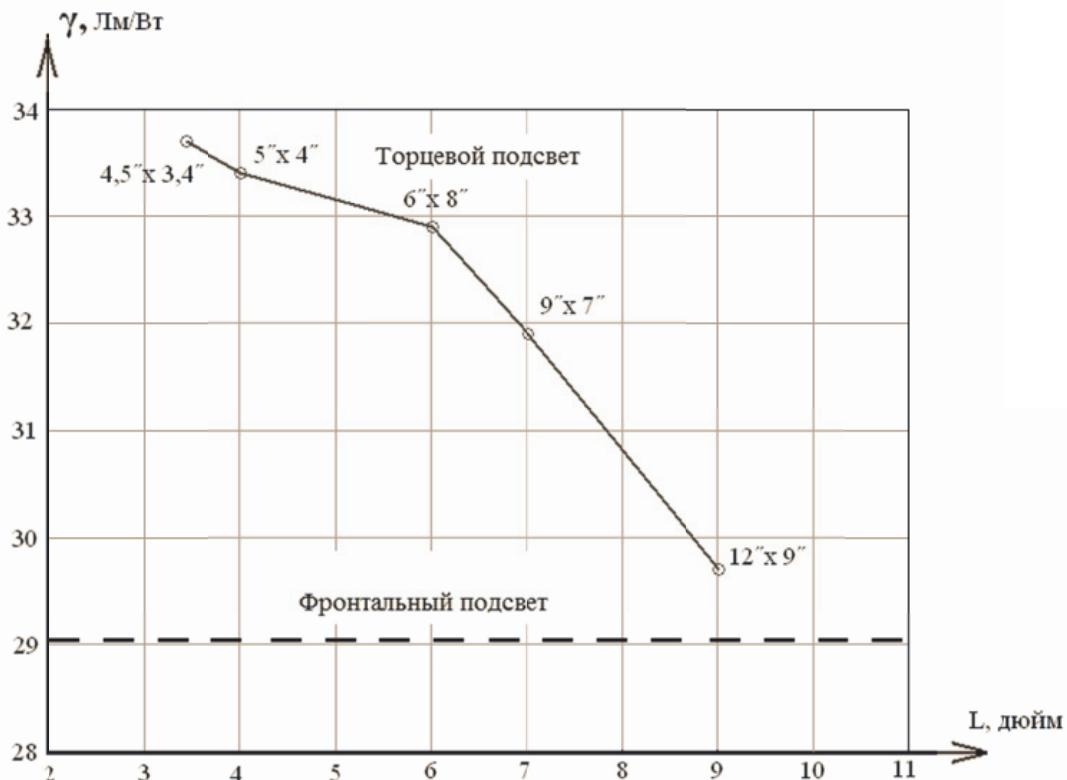
В данной статье проведено сравнение двух видов подсветов: торцевого и фронтального. Рассмотрены их достоинства и недостатки. Предложена математическая модель и метод выбора типа подсвета для конкретного типоразмера ЖК-дисплея.

Из рассмотрения достоинств и недостатков различных типов подсвета следует, что тип подсвета должен выбираться с учетом условий применения ЖК-дисплея и требуемых светотехнических и электрических характеристик.

Математическая модель и предложенный метод могут быть использованы для выбора типа светодиодного подсвета с учетом заданных светотехнических характеристик на первоначальном этапе проектирования.



**Рис. 9.** Результат светотехнического моделирования торцевого светодиодного подсвета 12''x9''



**Рис. 10.** Зависимость световой эффективности торцевого подсвета от типоразмера индикатора

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Харькин Д.В., Ефимов И.П. Математическая модель и метод построения модуля подсвета жидкокристаллических панелей на базе цветных светодиодов // Автоматизация процессов управления. 2017. № 3(49). С. 36-42
- Томилин М.Г., Невская Г.Е. Дисплеи на жидких кристаллах. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. 108 с.
- Шуберт Ф.Е. Светодиоды [пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича]. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
- Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. М.: Энергоатомиздат, 1983. 208 с.
- Kobayashi S., Mikoshiba S., Lim S. LCD Backlights // John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 279 с.
- Дадонов В.А., Бондарь А.А. Анализ развития и современного состояния рынка светотехники // Инженерный журнал: наука и инновации: электронное научно-техническое издание. 2014. № 5(29).
- Мынбаев К.Д. Технические применения светодиодных устройств: учеб.пособие. СПб.: НИУИТМО, 2016. 54 с.
- High-efficiency LED backlight optics designed with the flow-line method / J.C. Minano, P. Benitez, J. Chaves, M. Hernandez, O. Dross, A. Santamaría // SPIE Proceedings электронное научно-техническое издание. 2005. 5942, 594202.

#### MATHEMATICAL MODEL AND LIGHTING MODELING OF THE LED ILLUMINATION MODULE

© 2018 D.V. Kharkin, I.P. Efimov, D.Sh. Alimova, D.A. Tsyganov

Ulyanovsk Instrument Manufacturing Design Bureau

The article deals with the choice of the type of LED illumination of liquid crystal panels based on white LEDs. The application of various types of LED backlighting is considered, depending on the size of the liquid crystal panel, taking into account the light efficiency. The obtained mathematical models and algorithms allow to automate the process of choosing the type of LED illumination and the development of LED backlights with predicted lighting performance. There is an opportunity to promptly select elements for LED illumination with the required design parameters for a specific size of the liquid crystal panel at the initial stage of development.

**Keywords:** mathematical model, modeling, LED illumination, light guide, diffuser, front illumination, end illumination.

Dmitry Kharkin, Post-Graduate Student at the Measuring and Computing Complexes Department of UlSTU, head of the Research Department of JSC «UKBP». E-mail: hardim@mail.ru  
 Ivan Efimov, Candidate of Technics, Associate Professor at the «Measuring and Computing Complexes Department of UlSTU. E-mail: eip@ulstu.ru  
 Dinara Alimova, Post-Graduate Student of the Measuring

and Computing Complexes Department UlSTU, Head of the Complex Thematic Team of the Research Department of JSC «UKBP». E-mail: dinalimova@icloud.com  
 Dmitry Tsyganov, Post-Graduate Student at the Measuring and Computing Complexes Department UlSTU, Leading Research Engineer of the Research Department JSC «UKBP».