

## АВТОВОЛНОВЫЕ СТРУКТУРЫ В ПОПЕРЕЧНОМ ПРОФИЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ЛАЗЕРОВ

© 2015 А.В. Пахомов<sup>1,2</sup>, А.А. Кренц<sup>1,2</sup>, Д.А. Анчиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева  
(национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup> Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Поступила в редакцию 05.02.2015

Данная работа посвящена аналитическому и численному исследованию режимов динамики, реализующихся в широкоапертурных лазерах в результате потери устойчивости стационарной генерации. Показано, что в зависимости от типа пространственно-временных неустойчивостей в системе могут наблюдаться различные типы автоволновых структур оптического поля, а также автоколебательные процессы. Рассмотрены основные закономерности и сценарии формирования таких оптических структур в поперечном профиле излучения лазера.

*Ключевые слова:* широкоапертурный лазер, поперечная динамика оптического поля, пространственно-временные структуры.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для многих практических приложений актуальной является задача увеличения выходной мощности излучения лазерных систем. Одним из способов её решения служит увеличение поперечных размеров активной среды лазера. Однако существенный недостаток такого подхода состоит в том, что увеличение размеров апертуры приводит к возбуждению в резонаторе большого количества поперечных мод. В результате их нелинейного взаимодействия наблюдается сложная пространственно-временная динамика, сопровождающаяся образованием неоднородных оптических структур [1].

Целью настоящей работы являлось изучение условий развития неустойчивостей стационарной генерации широкоапертурных лазеров и основных закономерностей и сценариев возникновения неоднородных автоволновых структур. Знание характера протекания этих процессов в совокупности с обуславливающими их типами пространственно-временных неустойчивостей системы может позволить осуществлять управление динамикой поперечного профиля. Это открывает перспективу использования подобных сценариев для контролируемого формирования заданной поперечной структуры излучения лазера путём изменения управляющих параметров, что представляет практический интерес в сфере оптической передачи и обработки информации, оптической манипуляции микро- и наночастицами и др. [2-3]

*Пахомов Антон Владимирович, аспирант кафедры физики СГАУ, инженер СФ ФИАН. E-mail: pahotov\_91@mail.ru*

*Кренц Антон Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики СГАУ, инженер СФ ФИАН. E-mail: krenz86@mail.ru*

*Анчиков Дмитрий Александрович, аспирант кафедры физики СГАУ. E-mail: swadimaz@mail.ru*

В качестве математической модели широкоапертурного лазера использовалась полуклассическая система уравнений Максвелла-Блоха, которая описывает динамику оптического поля во времени в поперечном сечении выходного пучка с учетом отстройки частоты генерации от центра линии усиления для лазера бегущей волны, работающего на одной продольной моде плоскопараллельного резонатора:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial t} = ia\Delta_{\perp} E + \sigma(P - E), \\ \frac{\partial P}{\partial t} = -(1 + i\delta)P + DE, \\ \frac{\partial D}{\partial t} = -\gamma \left[ D - r + \frac{1}{2}(E^*P + EP^*) \right], \end{cases} \quad (1)$$

где  $E, P, D$  – безразмерные огибающие электрического поля, поляризации и инверсии населённости соответственно;  $\gamma = \gamma_I / \gamma_{\perp}$  и  $\sigma = k / \gamma_{\perp}$ , где  $\gamma_{\perp}, \gamma_I$  и  $k$  – скорости релаксации поляризации, инверсии населённости и электрического поля соответственно;  $\delta = (\omega_{21} - \omega) / \gamma_{\perp}$  – расстройка между центром линии усиления и частотой генерации, безразмерная на полуширину линии;  $a = c^2 / (2\omega\gamma_{\perp}d^2)$  – дифракционный параметр, где  $d$  – ширина апертуры;  $r$  – накачка, нормированная на пороговое значение [4].

### 2. ВОЛНОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СТАЦИОНАРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

В системе (1) выше порога генерации при отрицательном знаке отстройки устанавливается стационарная пространственно-однородная генерация:

$$\bar{D} = 1 + \left( \frac{\delta}{\sigma + 1} \right)^2; \quad \bar{E} = (r - \bar{D})^{0.5} \cdot e^{-i\Omega t};$$

$$\bar{P} = \frac{(\sigma - i\Omega) \cdot \bar{E}}{\sigma}; \quad \Omega = \frac{\delta\sigma}{\sigma + 1}.$$

Бифуркационный анализ режима стационарной генерации показывает различный характер потери устойчивости в зависимости от динамического класса лазера (рис. 1-2). Для лазеров класса В развивается волновая неустойчивость, проявляющаяся в виде роста малых пространственно-неоднородных возмущений с ненулевым значением волнового числа. Поперечная картина оптического поля лазера в этом случае определяется нелинейным взаимодействием таких неустойчивых возмущений, имеющих разные направления распространения.

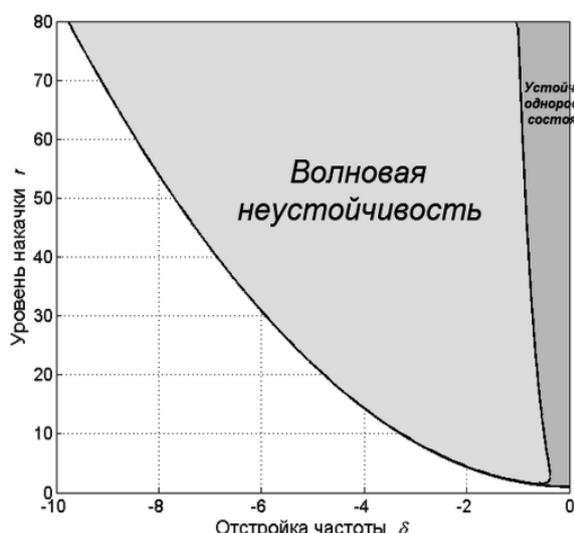


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма для лазера класса В;  $\sigma = 0.1, \gamma = 0.001$

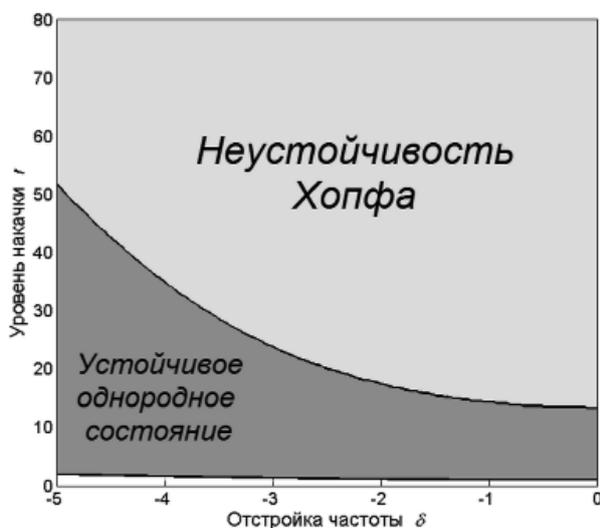
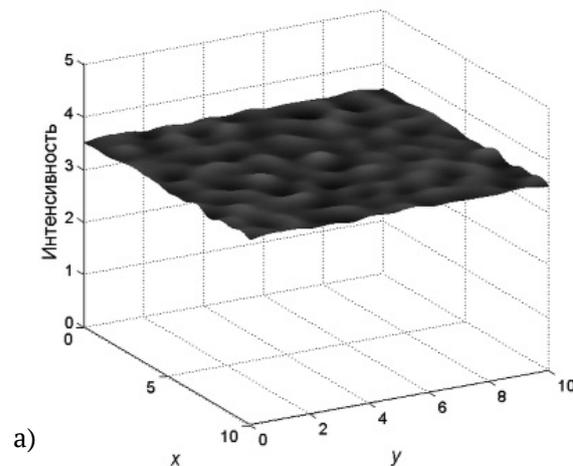
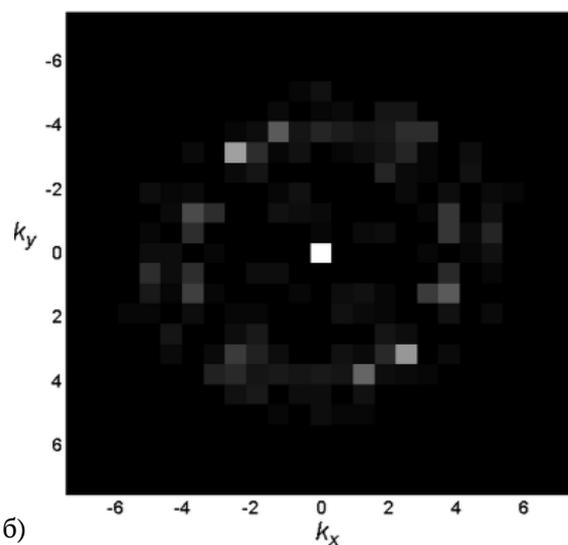


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма для лазера класса С;  $\sigma = 4, \gamma = 0.7$

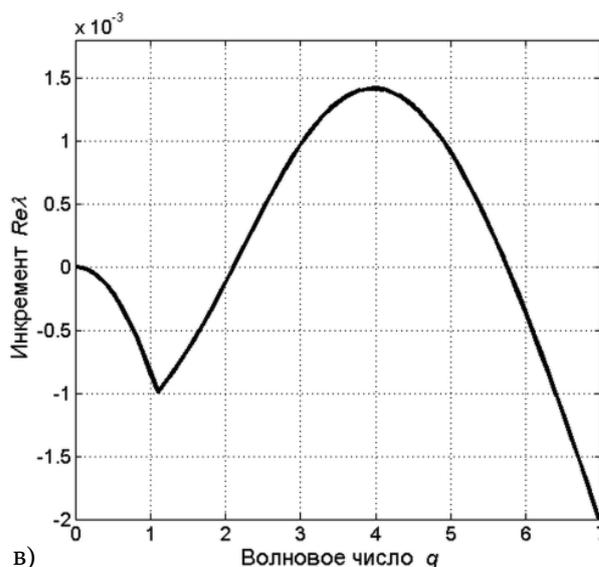
Ранее для самого простого одномерного случая обнаружено [5,6], что в результате развития волновой неустойчивости возникает простран-



а)



б)



в)

Рис. 3. Автоволновая структура при  $\sigma = 0.1, \gamma = 0.001, \delta = -1, r = 5$ : а – профиль интенсивности; б – пространственный спектр Фурье; в – дисперсионная кривая

ственно-временной профиль генерации в виде распространяющихся поперек апертуры автоволн, которые могут иметь как простую периодическую огибающую, так и многочастотную и даже хаотическую. В то же время в случае лазера с большими размерами апертуры в обоих поперечных направлениях развитая для одномерного случая аналитика становится уже неприменимой. Здесь ситуация осложняется вследствие неограниченного числа возможных направлений, в которых могут распространяться ставшие неустойчивыми волны. Поэтому исследовать этот случай оказывается возможным только численными методами. Проведение численного моделирования показало, что в системе не наблюдается образование упорядоченных структур – рост возмущений приводит лишь к нерегулярной пространственно-временной модуляции однородного профиля интенсивности (2). Это видно на рис. 3(а), где представлен мгновенный снимок поперечного профиля. Развивающиеся при этом неоднородности занимают в пространственном Фурье-спектре диапазон волновых чисел (рис. 3(б)), который соответствует неустойчивым модам (рис. 3(в)).

### 3. ОБРАЗОВАНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ АВТОВОЛНОВЫХ СТРУКТУР

Более разнообразная динамика наблюдается для лазеров класса С. Здесь потеря устойчивости стационарной генерации происходит посредством возникновения неустойчивости Хопфа. Неустойчивость Хопфа приводит к затуханию всех неоднородностей поперечного профиля (2), но этот профиль, оставаясь пространственно-однородным, начинает раскачиваться с течением времени. Для исследования условий возникновения неоднородной поперечной структуры поля в этом случае была предложена методика на основе стандартной теории Флоке [7]. Основная идея данной методики состояла в разложении малого возмущения в линеаризованной системе

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \hat{L}(t)\xi + \hat{D}\nabla \xi$$
 по пространственным

модам  $\xi(\vec{r}, t) = \sum_k \xi_k(t) \cdot e^{i\vec{k}\vec{r}}$ . В результате для

амплитуд этих мод получались уже линейные системы ОДУ, которые можно было исследовать с помощью аппарата ляпуновских характеристических показателей.

Этот подход позволил вычислить для каждой спектральной компоненты возмущения  $\xi(\vec{r}, t)$  соответствующие ему значения показателей, по сути, представляющие собой инкременты усиления этих возмущений. Рассчитанные предложенным способом значения в данной работе было решено называть показателями Флоке аналогично терминологии, использовавшейся в [7].

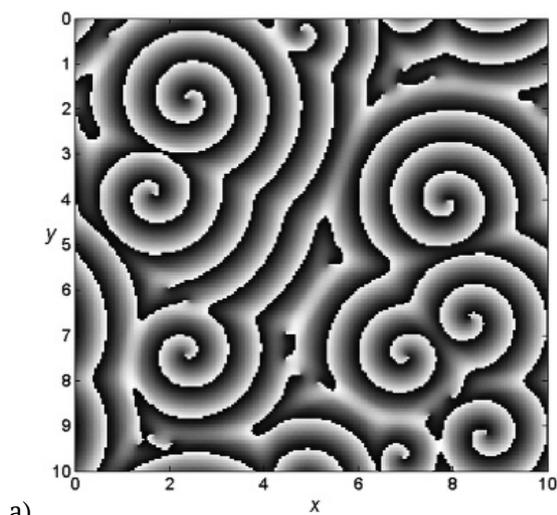
Стоит отметить, что выполненный анализ, основанный на теории Флоке, проводится в линейном приближении. Поэтому предсказательная способность построенных диаграмм показателей Флоке распространяется в общем случае лишь на линейную стадию роста возмущений. Однако и в таком приближении может быть сделан ряд важных качественных выводов, касающихся динамики рассматриваемой системы. Так, отсутствие положительных показателей, указывающее на устойчивость аттрактора точечной системы, должно приводить к установлению автоколебательного режима пространственно-однородной генерации. При наличии же положительных максимумов на диаграмме Флоке должно наблюдаться образование пространственно-неоднородных оптических структур. При этом стоит ожидать, что характерные размеры формирующихся структур будут находиться в удовлетворительном соответствии с волновым числом моды, дающей максимум на диаграмме.

Для проверки правильности последних выводов на нелинейной стадии роста возмущений проводилось численное моделирование, которое подтвердило результаты бифуркационного анализа. При наличии положительных показателей Флоке наблюдалось образование неоднородных оптических структур автоволнового типа: доменов спиральных волн или модулированной стоячей волны. Было также установлено, что характерные размеры получаемых структур удовлетворительно согласуются с размерами, соответствующими критической моде на диаграмме показателей Флоке.

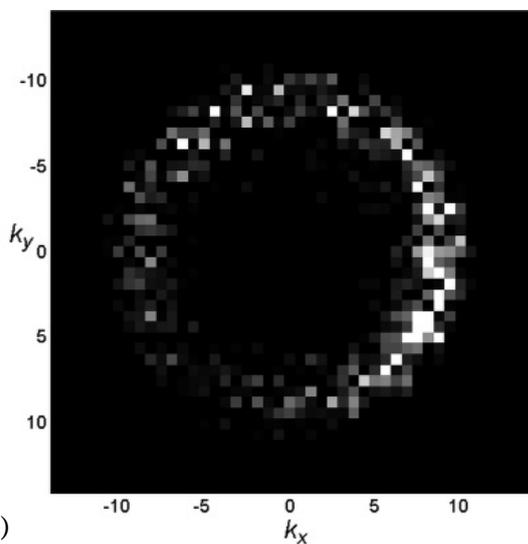
На рис. 4 показан режим генерации спиральных волн, который устанавливается при значениях параметров  $\sigma = 4$ ,  $\gamma = 0.7$ ,  $\delta = -0.5$ ,  $r = 20$ . Спиральные волны проявляются в распределении фазы электрического поля, приведенном на рис. 4(а). В дальнем поле (рис. 4(б)) при этом образуется кольцо, радиусы которого согласуются с волновыми числами неустойчивых мод на диаграмме Флоке (рис. 4(в)).

Другой режим динамики, сопровождающийся формированием автоволновых структур, наблюдается, например, для  $\sigma = 5$ ,  $\gamma = 0.1$ ,  $\delta = -2$ ,  $r = 30$ . При этих значениях параметров в системе образуется модулированная стоячая волна. На рис. 5(а) показан мгновенный профиль интенсивности.

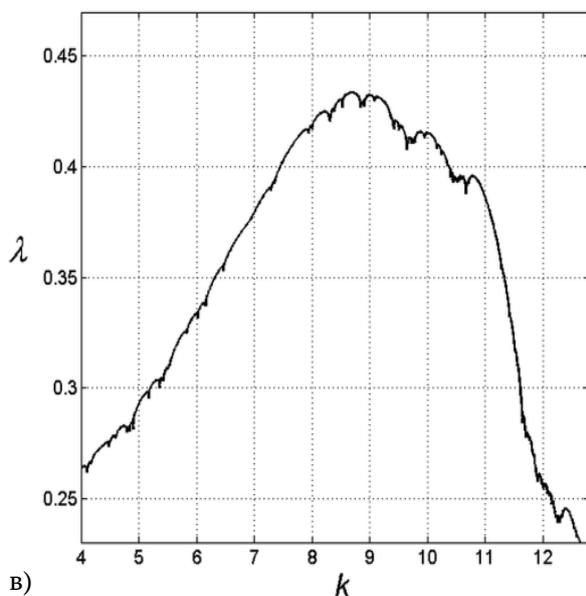
В такой структуре профиль интенсивности промодулирован в пространстве по сложной форме, но в каждой точке происходят периодические колебания интенсивности с некоторым фазовым сдвигом между разными точками. Рис. 5(б, в) показывают хорошее соответствие пространственного периода модуляции и волнового числа неустойчивой моды.



а)

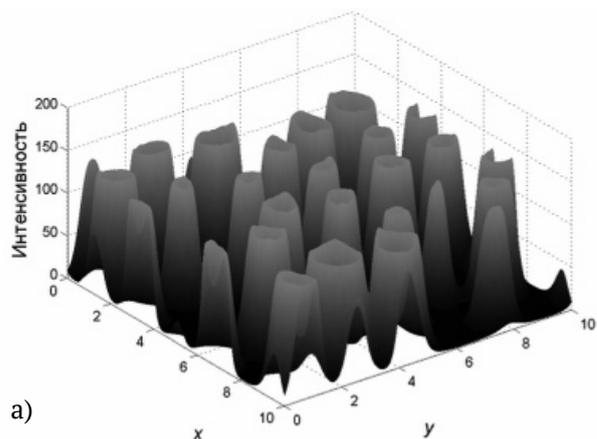


б)

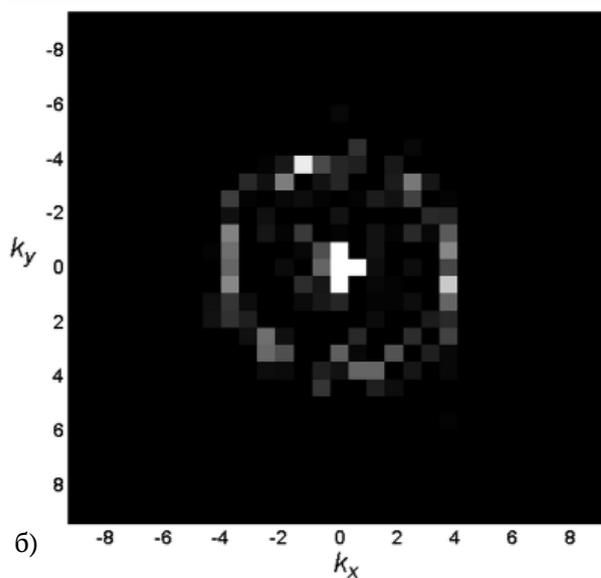


в)

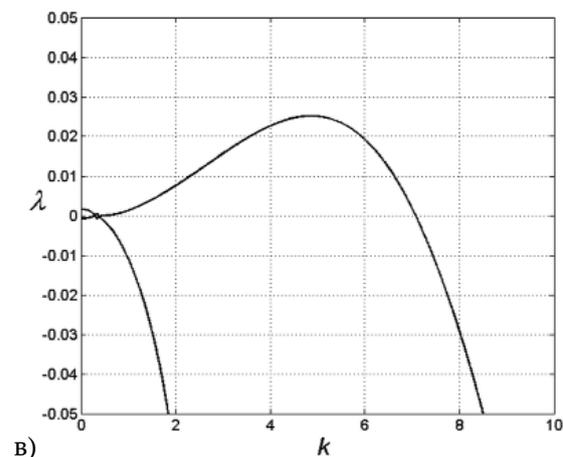
**Рис. 4.** Спиральные волны при  $\sigma = 4$ ,  $\gamma = 0.7$ ,  $\delta = -0.5$ ,  $r = 20$ : а – фаза электрического поля; б – пространственный спектр Фурье; в – диаграмма Флоке



а)



б)



в)

**Рис. 5.** Модулированная стоячая волна при  $\sigma = 5$ ,  $\gamma = 0.1$ ,  $\delta = -2$ ,  $r = 30$ : а – профиль интенсивности; б – пространственный спектр Фурье; в – диаграмма Флоке

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы режимы динамики, реализующиеся в широкоапертурных лазерах в результате потери устойчивости стационарной генерации. Показано, что в зависимости от типа

пространственно-временных неустойчивостей в системе могут наблюдаться автоволновые структуры, автоколебательные процессы, а также режимы неупорядоченной динамики. Выявлены бифуркационные механизмы, приводящие к спонтанному формированию поперечных автоволновых оптических структур. Изучены основные сценарии и условия формирования регулярных структур в поперечном профиле излучения лазера из начального пространственного шума. Значимость полученных результатов заключается в возможности предсказания режима генерации лазера в зависимости как от его параметров, так и от характеристик сигнала накачки. Именно понимание механизмов, лежащих в основе этих процессов, может способствовать решению задач, связанных с управлением поперечным профилем лазерного излучения.

*Работа частично поддержана Минобрнауки РФ в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013-2020 гг. и Государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности, проект 1451, НИР №ГР 114091840046, грантом РФФИ 14-02-31419 мол.а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Staliunas K., Sanchez-Morsillo V.J.* Transverse patterns in nonlinear optical resonators // Berlin: Springer Verlag, 2003. 222 p.
2. *Pedaci F., Barland S., Caboche E.* All-optical delay line using semiconductor cavity solitons // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. 011101.
3. *Krenn M., Fickler R., Fink M.* Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna // New Journal of Physics. 2014. Vol. 16. 113028.
4. *Ханин Я.И.* Основы динамики лазеров // М.: Наука. Физматлит, 1999. 368 с.
5. *Заикин А.П., Кургузкин А.А., Молевич Н.Е.* Периодические автоволновые структуры в широкоапертурном лазере с отстройкой частоты. 1. Бифуркационный анализ // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 6. С. 246-248.
6. *Заикин А.П., Кургузкин А.А., Молевич Н.Е.* Периодические автоволновые структуры в широкоапертурном лазере с отстройкой частоты. 2. Распределенная модель // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 6. С. 249-252.
7. *Pena B., Bestehorn M.* Two-dimensional wave patterns near a Hopf-Wave interaction in a chemical model // Eur. Phys. J. Spec. Topics. 2007. Vol. 146. PP. 301-311.

## THE AUTOWAVE PATTERNS IN TRANSVERSE SECTION OF WIDE-APERTURE LASERS EMISSION

© 2015 A.V. Pakhomov<sup>1,2</sup>, A.A. Krents<sup>1,2</sup>, D.A. Anchikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University)

<sup>2</sup> Samara Branch of Physical Institute of RAS named after P.N. Lebedev

Presented article is devoted to analytical and numerical investigation of wide-aperture lasers dynamic regimes resulting from the stability loss of the steady lasing. It is shown that depending on the type of spatio-temporal instability different autowave patterns may be observed in the system together with self-oscillating processes. Main principles and formation scenarios of these optical patterns in the transverse section of the wide-aperture laser emission are considered.

*Keywords:* wide-aperture laser, transverse dynamics of the optical field, spatio-temporal patterns.

*Anton Pakhomov, Graduate Student at the Physics Department of SSAU, Engineer. E-mail: pahomov\_91@mail.ru*

*Anton Krents, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Physics Department of SSAU, Engineer E-mail: krenz86@mail.ru*

*Dmitry Anchikov, Graduate Student at the Physics Department of SSAU. E-mail: swadimaz@mail.ru*