

## ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ВЧ-ФОТОИНЖЕКТОРОВ

*В. Парамонов<sup>1</sup>, А. Скасырская<sup>1</sup>, К. Floettmann<sup>2</sup>, М. Krasilnikov<sup>2</sup>, F. Stephan<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт Ядерных Исследований РАН, Москва;*

<sup>2</sup>*Deutsches Elektronen- Synchrotron, DESY, Hamburg, Zeuthen*

*E-mail: paramono@inr.ru*

Приведены расчетные характеристики резонатора для ВЧ-фотоинжекторов, работающих на частоте 1300 МГц в сочетании сильных электромагнитных полей и длинного ВЧ-импульса. Конструкция усовершенствованного резонатора использует апробированные решения, но содержит существенные изменения. В ячейки резонатора введены ВЧ-датчики. Проведена оптимизация характеристик резонатора по отдельным характеристикам. Но основное внимание уделено учету взаимного влияния процессов и поиску оптимальных решений по комплексу параметров резонатора в целом.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Существующая конструкция 1,5-ячеечного резонатора фотоинжектора L-диапазона, возбуждаемого на колебании  $E_{011}$ , с частотой 1300 МГц разработана [1] с целью формирования сгустков электронов с зарядом  $\sim 1$  пС для линейных коллайдеров и лазеров на свободных электронах. Для подавления сил пространственного заряда на поверхности фотокатода развивается напряженность электрического ВЧ-поля  $E_c \sim (40 \dots 60)$  МВ/м, для чего в резонатор вводится импульсная ВЧ  $P_i \sim (3 \dots 7)$  МВт. Основой ускорителя являются сверхпроводящие резонаторы с длиной ВЧ-импульса  $\tau \sim 1$  мс, что обуславливает высокую среднюю мощность  $P_a \sim (40 \dots 70)$  кВт, рассеиваемую в резонаторе.

В ходе программы исследований были разработаны несколько модификаций резонатора, Рис.1, различающиеся конструкцией системы охлаждения. Последняя модель, Gun 4, показала [2] рабочие характеристики, необходимые для инжектора международного проекта X-FEL – напряженность ВЧ-поля на фотокатоде  $E_c = 60$  МВ/м, длительность ВЧ-импульса  $\tau > 600$  мкс и среднюю ВЧ-мощность  $P_a > 50$  кВт.



Рис.1. Существующие модификации резонаторов для ВЧ-фотоинжектора DESY, Gun3 (а) и Gun 4 (б)

Дальнейшее развитие требует более существенных изменений. В статье приводятся проектные характеристики следующего резонатора – Gun 5. Результаты численного моделирования приводятся для предлагаемого резонатора Gun 5 и для существующего Gun 4, для которого есть экспериментальные результаты. Разработка использует полученные ранее результаты исследований резонатора и накопленный опыт изготовления. Особенностью работы является тщательный учет взаимного влияния про-

цессов в резонаторе, работающем в уникальном сочетании высоких значений импульсной и средней ВЧ-мощности, высокой напряженности ВЧ-поля и длинного ВЧ-импульса.

### 2. ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ЯЧЕЕК РЕЗОНАТОРА

В резонаторе сохранена концепция 1,5 ячеек с укороченной ( $\sim \lambda/2$ ) ячейкой фотокатода и полно-масштабной ( $\sim \lambda$ ) следующей ячейкой, разделенных диафрагмой, Рис.2. Максимум электрического поля  $E_{sm}$  рабочего колебания реализуется на поверхности диафрагмы и в существующей конфигурации со скругленной диафрагмой (см. Рис.2,а),  $E_{sm} = 1,2 E_c$ . Выполнение профиля диафрагмы с эллиптическим окончанием (см. Рис.2,б) позволяет уменьшить максимум электрического поля до  $E_{sm} = 1,0 E_c$ . При работе резонатора необходимо обеспечить заданную величину  $E_c$ , поэтому резонатор Gun 5 имеет заметно меньшую максимальную величину электрического поля на поверхности. Введение эллиптического профиля диафрагмы увеличивает с 5,1 до 6,15 МГц разделение по частоте колебаний рабочего  $\pi$  и соседнего 0-вида, что приводит к более высокой стабильности распределения поля.

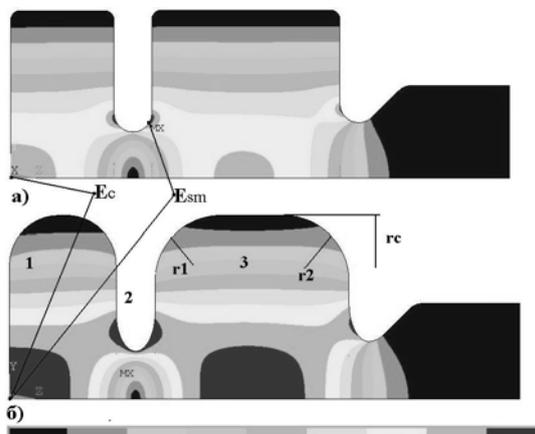


Рис.2. Распределения электрического поля в существующей (а) и модифицированной (б) конфигурациях резонатора. 1 – ячейка фотокатода, 2 – диафрагма, 3 – вторая ячейка

Для снижения мощности ВЧ-потерь применено закругление периферийных частей ячеек (см. Рис.2,б).

Исходя из условий согласования с каналами охлаждения выбрана конфигурация с равными радиусами  $R_c$  для обеих ячеек  $P_i$  и с одинаковым радиусом закруглений  $R_l$  в первой ячейке и у основания диафрагмы во второй. Обеспечение требуемой величины рабочей частоты резонатора и равенства максимальных величин электрического поля на оси ячеек резонатора обеспечивается подбором величин  $R_c$  и  $R_2$ .

В результате оптимизации [3], расчетная собственная добротность резонатора  $Q$  увеличена с 23400 до 25700, а требуемая для получения  $E_c = 60$  МВ/м расчетная величина  $P_i$  уменьшена с 6,43 до 6,24 МВт.

Исследования динамики сгустка электронов проведены с использованием программы ASTRA [4] для различных конфигураций профиля диафрагмы и периферийных частей ячеек. В пределах точности расчетов не обнаружено изменений в характеристиках ускоряемого сгустка, которые обуславливаются различиями в продольном распределении ускоряющего поля, вызываемыми различиями в форме периферии резонатора. При  $E_c = 60$  МВ/м сгусток становится релятивистским на расстоянии меньшем, чем половина длины первой ячейки, и в дальнейшем незначительные изменения в распределении поля по оси влияния не оказывают.

### 3. ИМПУЛЬСНЫЙ ВЧ-НАГРЕВ

При величине импульсной ВЧ-мощности  $P_i = 6,24$  МВт максимальная плотность ВЧ-мощности, рассеиваемой на поверхности резонатора,  $P_d = 48,77$  кВт/см<sup>2</sup>, что приводит к наблюдаемым Эффектам Импульсного ВЧ-нагрева (ВЧ ЭИН). Особенности ВЧ ЭИН для резонаторов L-диапазона рассмотрены в работе [5].

Распределение температуры на внутренней поверхности резонатора определяется двумя параметрами: ростом температуры на поверхности  $T_s$  за время ВЧ-импульса и длиной диффузии  $D_d$  – расстоянии в глубь тела резонатора, на котором рост температуры меньше в  $e$  раз по сравнению с ростом температуры на поверхности.

$$T_s = \frac{2P_d \sqrt{k\tau}}{\sqrt{\pi\rho c_\epsilon}}, \quad D_d = \sqrt{\frac{k\tau}{\rho c_\epsilon}}, \quad (1)$$

где  $\rho$ ,  $k$ ,  $c_\epsilon$  – плотность, теплопроводность и теплоемкость материала резонатора соответственно. За время ВЧ-импульса  $\tau \sim 1000$  мкс тепло проникает в тело резонатора на глубину  $D_d \sim 340$  мкм, формируя тонкую нагретую пленку на поверхности резонатора. Рассчитанные численно, по описанной в [5] методике, распределения  $T_s$  после ВЧ-импульса длительностью 1000 мкс показаны на Рис.3 для существующего резонатора Gun 4 (см. Рис.3,а) и разработанного Gun 5 (см. Рис.3,б) для  $E_c = 60$  МВ/м.

Расширение тонкой нагретой плёнки на поверхности приводит к деформациям резонатора во время ВЧ-импульса, которые зависят от конструкции.

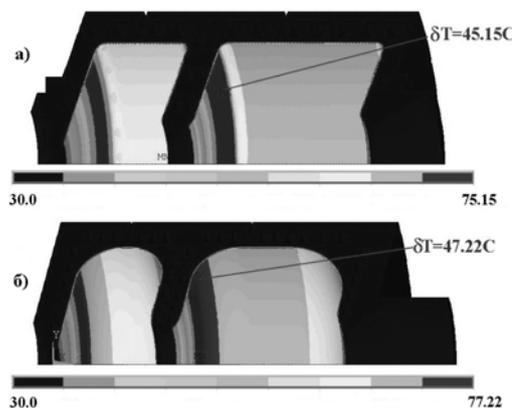


Рис.3. Расчетные распределения роста температуры  $T_s$  на поверхности резонаторов Gun 4 (а) и Gun 5 (б) после ВЧ-импульса  $\tau = 1000$  мкс для  $E_c = 60$  МВ/м

Рассчитанные распределения деформаций после ВЧ-импульса 1000 мкс показаны на Рис.4 для резонаторов Gun 4 и Gun 5 для условия  $E_c = 60$  МВ/м.

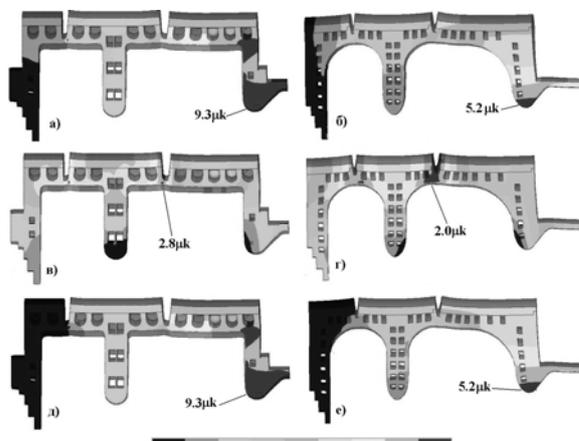


Рис.4. Расчетные распределения радиальных (а,б), продольных (в,з) и суммарных (д,е) деформаций резонаторов Gun 4 (а,в,д) и Gun 5 (б,з,е) после ВЧ-импульса  $\tau = 1000$  мкс для  $E_c = 60$  МВ/м

Конструктивно все резонаторы выполнены из трех частей, спаиваемых между собой серебряными припоями. Как видно из Рис.4, в существующих резонаторах импульсные деформации сосредоточены, в основном, в местах стыков деталей. В резонаторе Gun 5 деформации уменьшены по величине и более равномерно распределены по объёму резонатора.

Суммарной характеристикой формы и конструкции резонатора является параметр  $S_f$  – коэффициент пропорциональности между изменением частоты  $\mathcal{f}$  за время ВЧ-импульса, длительностью  $\tau$  и мощностью  $P_i$  импульса [5]. Для Gun 4 и Gun 5 величины  $S_f$  равны 2,7 [кГц/мс/МВт] и 2,5 [кГц/мс/МВт] соответственно.

ВЧ ЭИН является эффектом, ограничивающим максимально возможную длительность ВЧ-импульса. Изменение собственной частоты резонатора требует изменения фазы и амплитуды мощного ВЧ-сигнала во время ВЧ-импульса. При  $\mathcal{f}$ , сравнимой с шириной резонансной полосы резонатора, возможность обеспечения  $E_c = const$  и нужной фазы ВЧ-колебаний в резонаторе ограничены мощностью клистрона. Одновременное понижение требуемой

импульсной ВЧ-мощности и понижение чувствительности Gun 5 к ВЧ ЭИН дает возможность получения большей длительности ВЧ-импульса.

#### 4. ЭЛЕМЕНТЫ ДИАГНОСТИКИ

Каждая ячейка резонатора имеет ВЧ-зонд коаксиально-антенного тира, Рис.5. Учитывая высокую импульсную ВЧ-мощность в ячейке, ~ 3 МВт, конфигурация гнезда зонда, вместе с глубиной погружения антенны, выбрана для обеспечения ослабления ВЧ-сигнала на ~ 70 дБ.

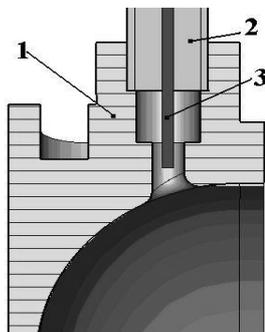


Рис.5. ВЧ-зонд в ячейке резонатора.

1 - тело резонатора, 2 - внешний (силовой) проводник зонда, 3 - центральный проводник (антенна)

В окрестности отверстия для зонда наблюдается искажение, с сильной концентрацией, распределения магнитного поля на поверхности резонатора. Для уменьшения ВЧ ЭИН в окрестности отверстия существенно необходимо закругление краёв отверстия, Рис.6. Расчеты роста температуры за время ВЧ-импульса дали величину  $T_s=75^\circ\text{C}$  после импульса 1000 мкс при  $E_c=60$  МВ/м. Это максимальное значение  $T_s$  на поверхности резонатора. Соответствующая величина внутренних напряжений в окрестности отверстия на порядок ниже предела упругих деформаций для отожженной меди OFE.

Для обеспечения квадрупольной составляющей в искажения поля в ячейках резонатора, диаметрально противоположно отверстиям для ВЧ-зондов, расположены имитирующие (заглушенные) углубления на поверхности.

Рассмотрена возможность введения датчиков вакуума, расположенных диаметрально противоположно ВЧ-зондам, вместо имитирующих углублений. При малом диаметре отверстий, что диктуется ВЧ ЭИН на ребрах отверстий и минимизацией искажения распределения поля, вакуумная проводимость такого канала весьма мала и введение датчиков вакуума не целесообразно.

#### 5. КОНСТРУКЦИЯ РЕЗОНАТОРА

В конструкции сохранены основные идеи и предусмотрены технологические решения, разработанные и хорошо апробированные для существующих резонаторов (см. Рис.6). Собственно резонатор состоит из трех частей (см. Рис.6,а), каждая из которых содержит деталь с каналами охлаждения радиальных поверхностей, выполненных из меди OFE. Важным элементом конструкции является фрагментированная обечайка, выполненная из нержавеющей стали. Обечайка служит для крепления штуцеров ввода-вывода

воды, размещения монтажных и юстировочных элементов. Повышая жесткость конструкции в радиальном направлении, введение обечайки приводит к уменьшению изменения частоты резонатора как при ВЧ ЭИН, так и в стационарном режиме.

Соединение частей резонатора производится в несколько этапов высокотемпературной пайкой припоями на основе серебра. Паяные соединения вода-вакуум в конструкции отсутствуют.

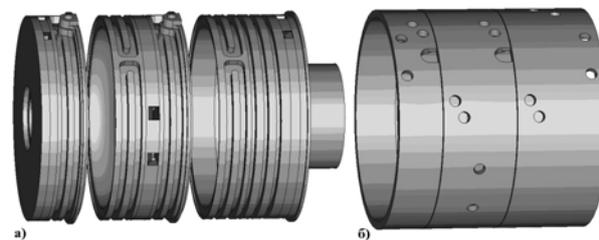


Рис.6. Три составных части резонатора (а) и внешняя обечайка (б)

#### 6. РАСЧЕТ РЕЖИМА ОХЛАЖДЕНИЯ

Средняя мощность ВЧ-потерь в резонаторе  $P_a > 50$  кВт соответствует эквивалентной погонной плотности  $P_l > 250$  кВт/м. Это на порядок выше величины, характерной для нормально-проводящих структур в современных интенсивных ускорителях ионов.

При исследовании такого напряженного теплового режима необходима максимально возможная полнота и точность учета деталей – направления и распределения скоростей потока по каналам, учет нагревания воды при движении по каналу и т.д.

Для расчета систем охлаждения резонаторов с высокой тепловой нагрузкой, на основе комплекса ANSYS, реализована самосогласованная процедура трехмерного численного анализа.

В каналах охлаждения выбранной конфигурации численно рассчитываются локальные характеристики турбулентного потока жидкости. Например, на Рис.7 показаны расчетные распределения давления (см. Рис.7,б,а) и скорости потока (см. Рис.7,б) в канале охлаждения задней стенки резонатора. С учетом реального распределения ВЧ-потерь по поверхности резонатора решается задача согласованного теплообмена и рассчитывается распределение температуры в теле резонатора. Варьируемые параметры стандартной  $k-\varepsilon$  модели турбулентности подобраны для максимального совпадения расчетных распределений температур для существующих резонаторов с экспериментальными данными.

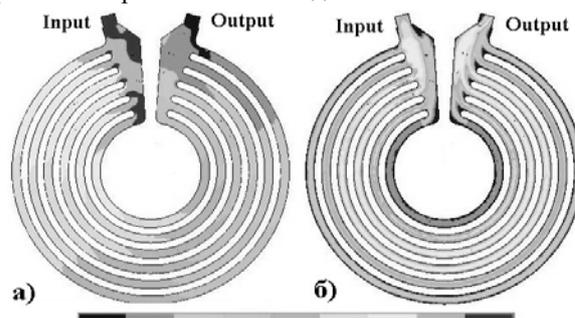


Рис.7. Расчетное распределение давления (а) и скорости потока (б) в канале охлаждения задней стенки резонатора Gun 5

В дальнейшем, в соответствии с разработанной ранее процедурой полного анализа в трехмерном приближении [6] (использовавшей ранее инженерное приближение для определения коэффициента теплообмена на поверхности каналов), рассчитываются напряжения и деформации в резонаторе и определяется изменение радиотехнических характеристик – изменение частоты и добротности.

## 7. СХЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ

Как результаты эксплуатации существующих резонаторов, так и расчетные исследования [7,8], позволили сформулировать рекомендации по усовершенствованию. С учетом разработки методики самосогласованного расчета, предложено существенное изменение схемы.

Предложенная схема в целом показана на Рис.8,а и содержит 9 каналов – для охлаждения цилиндрической стенки в окрестности ВЧ-зонда (1 на Рис.8,б), для охлаждения гладких участков цилиндрической стенки (2 на Рис.8,б) и каналов для охлаждения радиальных стенок резонатора (3 на Рис.8,б).

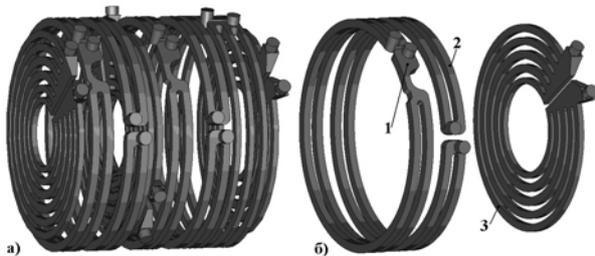


Рис.8. Общая схема каналов охлаждения (а) и размеры каналов (б). 1 – канал для охлаждения цилиндрической стенки в окрестности ВЧ-зонда, 2 – простой канал на цилиндрической стенке, 3 – канал для охлаждения радиальной поверхности

Распределение каналов по частям резонатора соответствует распределению мощности ВЧ-потерь. Применение каналов с разделением потоков внутри резонатора позволяет:

- увеличить эффективность охлаждения за счет увеличения суммарной площади поверхности;
- разумно ограничить количество вводов-выводов воды, разумно упрощая внешнюю систему распределения;
- более эффективно распределить поток жидкости, обеспечив эффективность охлаждения в местах высокой и разумно ограничив поток в местах низкой плотности ВЧ-потерь.

Каналы цилиндрической части резонатора рассчитаны для равенства скоростей и величин потока жидкости в ветвях канала. В ветвях каналов для охлаждения радиальных частей скорости и величины потоков жидкости подобраны в соответствии с радиальным профилем распределения ВЧ-мощности.

Например, в канале для охлаждения задней стенки резонатора (см. Рис.7,б) распределение средних скоростей потоков в ветвях подобрано в отношении 0,68:0,74:0,93:1:1:0,8. Сравнение распределений температур в данном канале с распределением температур в канале типа меандр (см. Рис.9,б) для максимального значения средней скорости потока в ветвях  $V_f = 1,5$  м/с и мощности ВЧ-потерь в резонаторе

$Pa = 62,5$  кВт показано на Рис.9. В канале меандр тепло переносится от центральной части резонатора к периферийной и затем выводится. Как видно из Рис.9,а, в оптимизированном канале температура жидкости на выходах ветвей ниже и примерно одинакова для разных ветвей. Это устраняет дополнительное повышение температуры цилиндрической стенки и ведет к меньшему изменению частоты резонатора из-за тепловых деформаций.

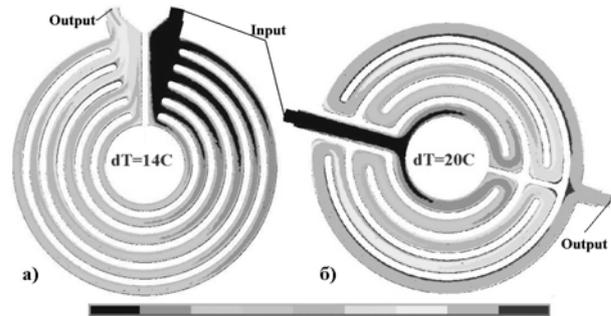


Рис.9. Распределение температуры потока в оптимизированном канале (а) и канале типа меандр (б) при максимальной скорости потока 2 м/с

Величина и разброс гидравлического сопротивления каналов меньше аналогичных параметров для существующих резонаторов, что упрощает внешнюю систему распределения жидкости. При одинаковом значении  $V_f$  расход охлаждающей жидкости меньше на 15% чем в Gun 4. Для рабочего режима резонатора по требованиям X-FEL ( $Pa \sim 50$  кВт) расчетное (достаточное) значение  $V_f < 1,5$  м/с.

Комплекс взаимосвязанных мер по оптимизации схемы охлаждения, конструкции резонатора и формы ячеек привёл к существенному уменьшению изменения частоты резонатора при изменении мощности ВЧ-потерь. Расчетное значение производной  $d(\delta f) / dPa$ , [кГц/кВт] равно 3,52 и 1,92 кГц/кВт для Gun 4 и Gun 5 соответственно. Это позволит обеспечить рабочий режим Gun 5 с большей величиной  $Pa$  за счет увеличения частоты повторения или длительности ВЧ-импульсов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены проектные характеристики усовершенствованного резонатора L-диапазона для ВЧ-фото-инжекторов, предназначенного для работы в уникальном сочетании высоких значений импульсной и средней ВЧ-мощности, высокой напряженности ВЧ-поля и длинного ВЧ-импульса. В концепции и конструкции резонатора сохранены решения, проверенные и хорошо зарекомендовавшие себя в существующих образцах, что обеспечивает технологическую реализуемость и надежность работы. Предусмотрены ВЧ-датчики в ячейках резонатора. В результате проведенной оптимизации резонатор имеет превосходство, не всегда значительное, по каждому отдельному взятому параметру. Но основное внимание уделено поиску оптимальных решений с учетом взаимосвязи всех процессов. В результате, по комплексу параметров в целом, усовершенствованный резонатор имеет существенное преимущество по сравнению с существующими образцами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. B. Dwersteg, K. Floettmann, J. Sekutowicz, Ch. Stolzenburg. RF gun design for the TESLA VUV Free Electron Laser // *NIM*. 1997, v.A393, p.93-95.
2. F. Stephan, et al. New Experimental Results from PITZ // *Proc. 2008 Linac Conference*. Vancouver, 2008, p.474-476.
3. V. Paramonov, Yu. Kalinin, M. Krasilnikov, T. Scholz, F. Stephan, K. Floettmann. RF Gun Development with Improved Parameters // *Proc. 2008 Linac Conference*. Vancouver, 2008, p.627-629.
4. K. Floettmann, ASTRA – A Space Charge Tracking Algorithm, available at <http://www.desy.de/~mpyflo/>.
5. В. Парамонов, А. Скасырская, К. Floettmann, F. Stephan. Исследование эффектов импульсного ВЧ-нагрева в нормально проводящих резонаторах L-диапазона // *Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2008, №3, с.51-54.
6. S.C. Joshi, V.V. Paramonov, A.K. Skasyrskaya. The complete 3D coupled RF-thermal-structural-RF analysis procedure // *Proc. 2002 Linac Conference*. Korea, 2002, p.216.
7. F. Marhauser. *Finite Element Analysis for RF Photo Injector TESLA-FEL*: DESY, 2006-02, Hamburg, 2006.
8. K. Floettmann, V.V. Paramonov, A.K. Skasyrskaya, F. Stephan. *RF Gun Cavities Cooling Regime Study. TESLA-FEL*: DESY, 2008-02, Hamburg, 2008.

*Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.*

## DESIGN PARAMETERS OF THE IMPROVED RF GUN CAVITY

*V. Paramonov, A. Skasyrskaya, K. Floettmann, M. Krasilnikov, F. Stephan*

During development and operation of DESY L-band RF gun cavities, desires for further improvements were formulated. The next step of development is based on the proven advantages of existing cavities, but includes very significant changes. The L-band 1.6 cell RF gun cavity is intended for operation in pulse mode with unique combination of high RF fields and long RF pulse. Each cavity cell is equipped with RF probe. The cavity design is improved to gain an advantage over existing cavities in certain parameters. But main attention paid for coupled optimization to improve the cavity parameters in total. The design ideas and expected results are described.

## ПРОЕКТНІ ПАРАМЕТРИ ВДОСКОНАЛЕНОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ВЧ-ФОТОІНЖЕКТОРІВ

*В. Парамонов, А. Скасырська, К. Floettmann, М. Кrasilnikov, F. Stephan*

Наведено розрахункові характеристики резонатора для ВЧ-фотоінжекторів, що працюють на частоті 1300 МГц у сполученні сильних електромагнітних полів і довгого ВЧ-імпульса. Конструкція вдосконаленого резонатора використовує апробовані рішення, але містить істотні зміни. В осередки резонатора уведені ВЧ-датчики. Проведено оптимізацію характеристик резонатора по окремих характеристиках. Але основна увага приділена обліку взаємного впливу процесів і пошуку оптимальних рішень із комплексу параметрів резонатора в цілому.