

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА МЕМБРАНЕ ВЫПУСКНОГО ОКНА УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-200

*И. В. Бурков<sup>1</sup>, А. П. Сумбаев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Разработана методика экспресс-оценки температурных полей с использованием градуированной кривой, которая может быть применена при обосновании надежности и безопасности эксплуатации мембраны ускорителя ЛУЭ-200 — драйвера импульсного источника резонансных нейтронов ИРЕН. Для этой цели проведено многовариантное численное моделирование с использованием разработанных расчетных моделей канала транспортировки и мембраны выпускного окна.

A technique has been developed for express estimation of temperature fields using a graded curve, which can be used to justify the reliability and safety of operation of the outlet window membrane of the LUE-200 accelerator — a driver of a pulsed Intense Resonance Neutron source (IREN). For this purpose, a multivariate numerical simulation was carried out using the developed computational models of the transportation channel and the outlet window membrane.

PACS: 06.20.-f; 44.05.+e; 45.05.+x

### ВВЕДЕНИЕ

Установка ИРЕН [1] — интенсивный импульсный источник резонансных нейтронов — представляет собой традиционную для ОИЯИ комбинацию из драйвера (линейного ускорителя электронов ЛУЭ-200 [2, 3]) и мишени  $e-\gamma-n$ -конвертера с замедлителем. Проектные параметры ИРЕН по выходу нейтронов задают среднюю мощность пучка электронов  $P_{av} \sim 10$  кВт при длительности импульса  $\tau = 250$  нс, значении тока электронов в импульсе  $I = 1,5$  А, энергии электронов в пучке на уровне  $E = 200$  МэВ и частоте следования импульсов  $f = 150$  Гц. Достигнутые к настоящему времени результаты, полученные при эксплуатации ускорителя ЛУЭ-200 с мощностью пучка  $\approx 0,41$  кВт при энергии пучка  $E = 50-60$  МэВ, токе в импульсе  $I = 1,5$  А, длительности импульса  $\tau = 100$  нс и частоте циклов  $f = 50$  Гц, указывают на необходимость дальнейшей модернизации ускорителя и его развития с целью получения более высоких энергетических и мощностных характеристик пучка электронов, близких к проектным. Повышение средней мощности пучка  $P = f \int_0^{\tau} I(t) E(t) dt$ , в принципе, возможно как за счет повышения энергии  $E$  и тока  $I$  пучка, так и за счет

---

<sup>1</sup>E-mail: IVBurkov@jinr.ru

увеличения частоты циклов  $f$ . В любом случае повышение мощности пучка означает переход на более энергонапряженные условия эксплуатации «ответственного» оборудования ускорителя. Для ускорителя ЛУЭ-200 к такому оборудованию необходимо отнести, помимо электронной пушки и ускоряющих секций, прежде всего мембрану выпускного патрубка, состояние которой напрямую влияет на надежность всего ускорителя в целом.

В существующей конфигурации ЛУЭ-200 ускоренный пучок транспортируется от второй ускоряющей секции к нейтронопроизводящей мишени — конвертеру по вакуумированному электропроводу, который заканчивается выпускным патрубком диаметром 40 мм, закрытым с торца мембраной из нержавеющей стали 12X18Н10Т толщиной 0,3 мм. Общий вид выпускного окна и мишени с конвертером из вольфрама представлен на рис. 1. Пучок пропускается через мембрану насквозь в атмосферу и через короткий воздушный промежуток протяженностью  $\sim 30$  мм попадает на мишень, где полностью поглощается, производя тормозные  $\gamma$ -кванты. Образовавшиеся при этом в конвертере фотонейтроны распространяются в 4 $\pi$ -пространство и являются конечным продуктом источника ИРЕН.

В процессе эксплуатации часть мощности пучка, выделяющаяся в мембране за счет потери энергии электронами, приводит к ее разогреву. Следовательно, любое изменение мощности пучка при отсутствии эффективных критериев оценки состояния мембраны может негативно сказаться на ее надежности. В связи с чем решение о переходе на новый уровень средней мощности пучка должно приниматься в том числе на основании оценок температурных полей, возникающих на мембране.

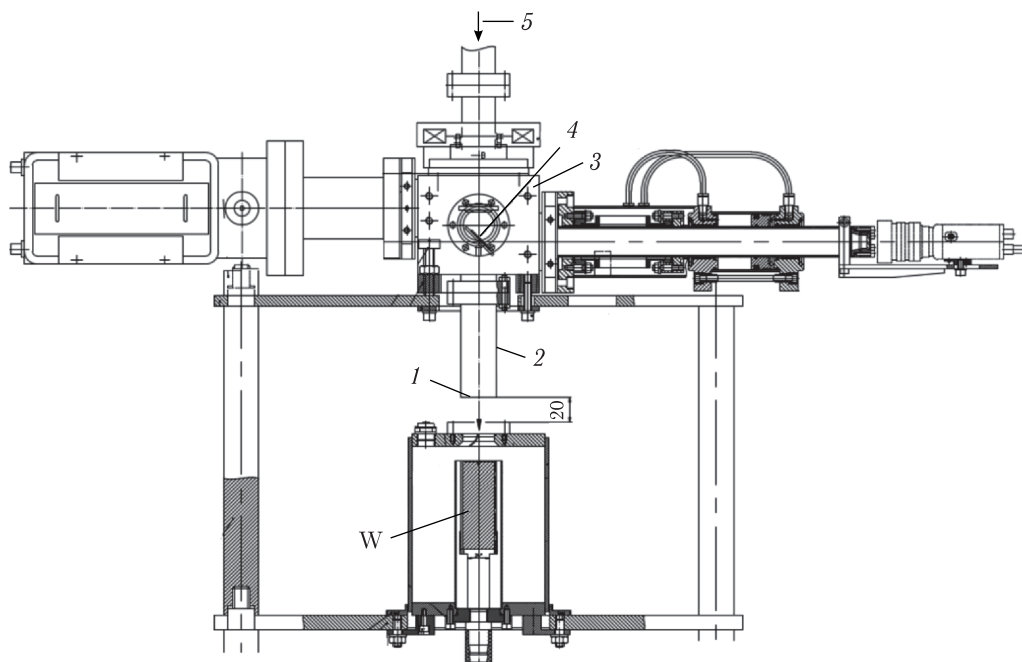


Рис. 1. Общий вид: 1 — мембрана выпускного окна; 2 — выпускной патрубок; 3 — пятый диагностический пост; 4 — бимбьювер BV; 5 — электронный пучок; W — мишень-конвертер

## ОЦЕНКА ПОЛНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ОБЪЕМЕ МЕМБРАНЫ

Допустим, что сечение пучка, падающего на мембрану, имеет форму эллипса с полуосями  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  (в частном случае  $\sigma_x = \sigma_y$ ), а распределение плотности частиц пучка по сечению пучка близко к гауссовому:

$$\rho(x, y) = \rho_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — плотность тока пучка на оси, а  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — среднеквадратичные размеры поперечного сечения пучка. При этом будем иметь в виду, что в размерах  $r_x = \sigma_x$ ,  $r_y = \sigma_y$  сосредоточено  $\approx 67\%$  частиц, в размерах  $r_x = 2\sigma_x$ ,  $r_y = 2\sigma_y$  — около  $95\%$  частиц пучка, а в размерах  $r_x = 3\sigma_x$ ,  $r_y = 3\sigma_y$  — около  $99\%$  частиц. Параметры распределения интенсивности пучка электронов на мембране выпускного окна оценены как  $\sigma_x \approx \sigma_y \approx 4,5$  мм на основании представленного на рис. 2 видеоизображения «автографа» пучка перед мишенью, полученного с помощью люминофорного экрана бимбьюера (BV).

Представим мембрану выпускного окна в форме короткого цилиндра из нержавеющей стали диаметром 40 мм и толщиной 0,3 мм. Пусть имеется некое нормированное объемное распределение потери энергии электроном  $E(E_e, V)$ , зависящее от его кинетической энергии и возникающее при взаимодействии его с атомами материала мембраны. Тогда полное энергосодержание в объеме мембраны будет определяться как произведение частоты повторений циклов ускорения пучка  $f$ , элементарного заряда  $e$  и полной потери энергии в объеме мембраны по следующей формуле:

$$W = feE_{tot}. \quad (2)$$

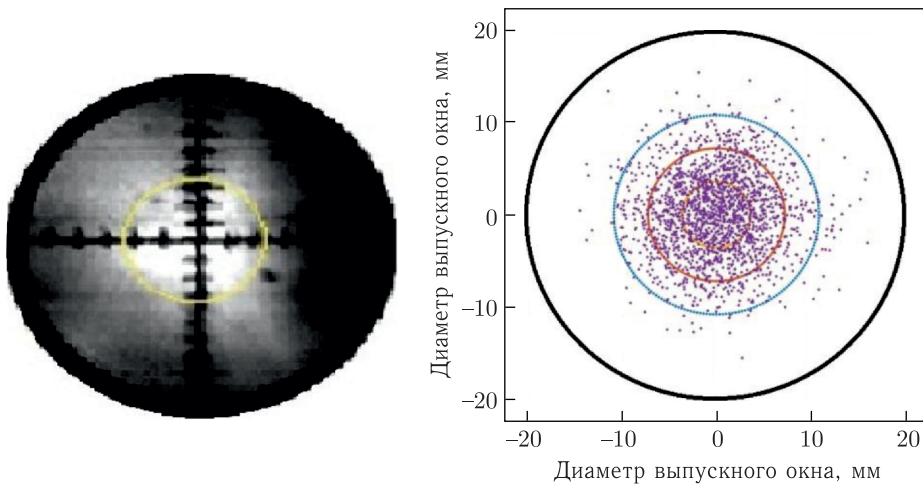


Рис. 2. Автограф пучка электронов на BV-5 (перед мишенью)

Полная потеря энергии в объеме мембраны пропорциональна потере энергии, нормированной на один электрон, и определяется по следующей формуле:

$$E_{\text{tot}} = N_e V \int \langle E(E_e, V) \rangle dV. \quad (3)$$

При обобщении формул (2), (3) и переходе к цилиндрическим координатам получаем выражение, позволяющее произвести оценку энерговыделения в мембране и имеющее следующий вид:

$$W = \alpha f \text{INT} = \alpha f \int_0^R \int_0^H \langle E(E_e, H, R) \rangle dR dH, \quad (4)$$

где  $\alpha = 2\pi^2 R^2 H I \tau$  — константа, зависящая от энергетических характеристик пучка при заданных геометрии и параметрах мембраны ( $\text{см}^3 \cdot \text{А}$ );  $R$  — радиус мембраны ( $\text{см}$ );  $H$  — толщина мембраны ( $\text{см}$ );  $I$  — ток пучка ( $\text{А}$ );  $\tau$  — длительность импульса ( $\text{нс}$ ).

Для обеспечения надежной работы «ответственного» оборудования далее по тексту при проведении расчетов использован консервативный подход, в частности, рассматривается предельный проектный случай, результаты которого допускается использовать для менее напряженных режимов работы установки. Предполагается, что через мембрану выпускного окна пропускается пучок электронов со средней кинетической энергией 200 МэВ, с силой тока 1,5 А и частотой повторений импульсов 150 Гц. Эффективная длительность импульса составляет 250 нс.

Расчет значений коэффициентов  $\alpha$ , представленных в табл. 1, проводится в соответствии с формулой (3) для различной длительности импульса и величины тока в пучке.

Таблица 1. Значения коэффициента  $\alpha \times 10^{-7}$

Величина тока в пучке, А	Длительность импульсов, нс				
	50	100	150	200	250
1,00	1,16	2,32	3,48	4,64	5,81
1,25	1,45	2,90	4,35	5,84	7,26
1,50	1,74	3,48	5,23	6,97	8,71

Для оценки нормированного объемного распределения потери энергии электроном  $E(E_e, V)$  разработана расчетная модель мембраны выпускного окна, которая учитывает распределение плотности тока по сечению пучка (формула (4)) и теплофизические характеристики конструкционной стали. Численное моделирование проведено для различной кинетической энергии электронов в пучке с использованием программного средства FLUKA [4]. В качестве примера на рис. 3 представлен результат моделирования для рассматриваемого в данной работе случая.

Согласно формуле (3) и после численного интегрирования фазовой плоскости по толщине и радиусу с использованием метода трапеций оценены значения интеграла INT для различной средней кинетической энергии электрона в пучке. Значения интеграла INT приведены в табл. 2.

Окончательная оценка энерговыделения в мембране сводится к поиску значений коэффициента  $\alpha$  и интеграла INT на основании известных параметров мембраны

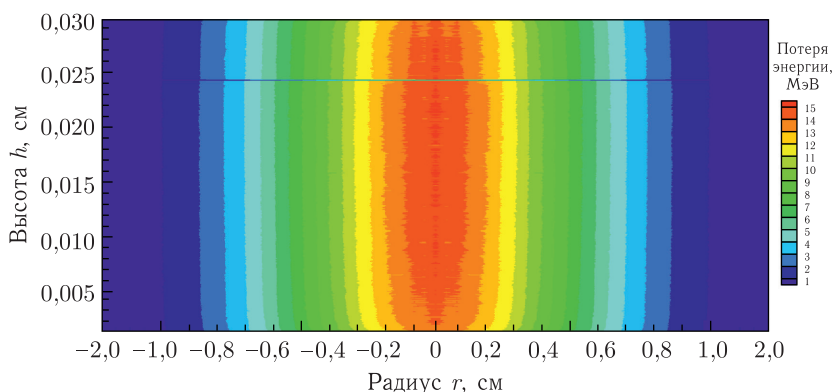


Рис. 3. Нормированное объемное распределение  $E(E_e, V)$

Таблица 2. Значения интеграла INT

Диаметр, см	Средняя кинетическая энергия электронов, МэВ			
	50	100	150	200
0,9	171062 ± 167	176157 ± 172	179061 ± 178	180796 ± 184
1,2	201197 ± 208	207183 ± 215	210665 ± 223	212738 ± 228
1,5	218674 ± 255	225158 ± 263	228927 ± 274	231212 ± 280
Полный	233757 ± 4185	240672 ± 4311	244650 ± 4365	247079 ± 4461

выпускного окна и энергетических характеристик пучка с последующей подстановкой найденных значений в формулу (3). В рамках рассматриваемого в данной работе случая полное энерговыделение в объеме мембраны оценивается следующим образом:

$$W = \alpha f \text{INT} = 8,71 \cdot 10^{-7} \cdot 150 \cdot 247079 = (32,28 \pm 0,58) \text{ Вт.}$$

При использовании консервативного подхода в качестве искомого значения энерговыделения следует принимать верхнюю границу интервала, т. е. 32,86 или 33 Вт.

Также следует отметить, что на относительно большом удалении от поверхности ( $h \geq 0,005$  см) нормированное объемное распределение потери энергии электроном перестает зависеть от параметров мембраны (см. рис. 3). Следовательно, при расчете полного энерговыделения в мембране допускается использование коэффициента, характеризующего отклонение толщины мембраны от исходного значения в случае, если толщина мембраны относится к числу варьируемых параметров.

### ОЦЕНКА ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР

Для проведения оценок полей температур, возникающих на мембране при работе установки, поставлена термомеханическая задача, решение которой выполнено конечно-разностным методом с использованием программного продукта ANSYS Discovery Live (далее — ПС ANSYS) [5].

Для решения задачи с помощью ПК ANSYS [5] разработана расчетная модель конечного участка канала транспортировки пучка ускорителя ЛУЭ-200 (см. рис. 1), которая включает в себя пятый диагностический пост, выпускной патрубок и мембрану выпускного окна. При разработке термомеханической расчетной модели канала транспортировки учтены основные теплофизические характеристики конструкционной стали, распределение плотности тока по сечению пучка (см. рис. 2) и нормированное объемное энерговыделение (см. рис. 3), а также характеристики окружающей среды и наличие вакуума в полости патрубка.

Очевидно, что энерговыделение, оцененное с использованием предложенной методики, укладывается в короткий промежуток  $t = f\tau \ll 1$ , в то время как остальной промежуток  $T = 1 - t$  равномерно распределен между импульсами. Подобные изменения уровня энерговыделения приводят к возникновению таких явлений, как пульсация градиента температур и ее пилообразное изменение, обусловленных тепловой инерционностью материала мембраны, что стало основной сложностью, возникшей при постановке термомеханической задачи. Это особенно сильно проявляется при низкой частоте циклов ускорения и нивелируется с ее ростом. Планируемые режимы работы установки ИРЕН предполагают достижение достаточно высоких значений частоты циклов, что позволяет применить при разработке расчетной модели приближение средней мощности электронного пучка.

Анализ результатов, полученных с использованием разработанной расчетной модели, включает в себя оценки напряженно-деформированного состояния (далее — НДС) и полей температур, возникающих при воздействии на мембрану электронного пучка и вакуума. На рис. 4 и 5 представлены оценки возникающих на мембране выпускного окна НДС для режима работы ускорителя в области допустимой эксплуатации и поля температур для максимально проектного режима работы ускорителя соответственно.

На рис. 4 видно, что мембрана имеет значительные деформации (прогиб внутрь), обусловленные нагревом и наличием вакуума в полости патрубка. Кроме того, максимальные напряжения локализируются в центральной области мембраны  $r_x = r_y = 10$  мм и не зависят от интенсивности конвективного теплообмена с ее поверхности. Подобные изменения геометрии мембраны выпускного окна способствуют ухудшению условий эксплуатации «ответственного» оборудования, что в конечном итоге может стать причиной серьезной аварии на ускорителе ЛУЭ-200.

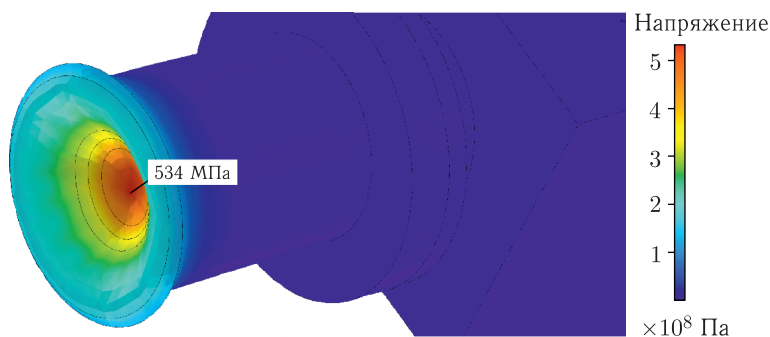


Рис. 4. НДС мембраны выпускного окна

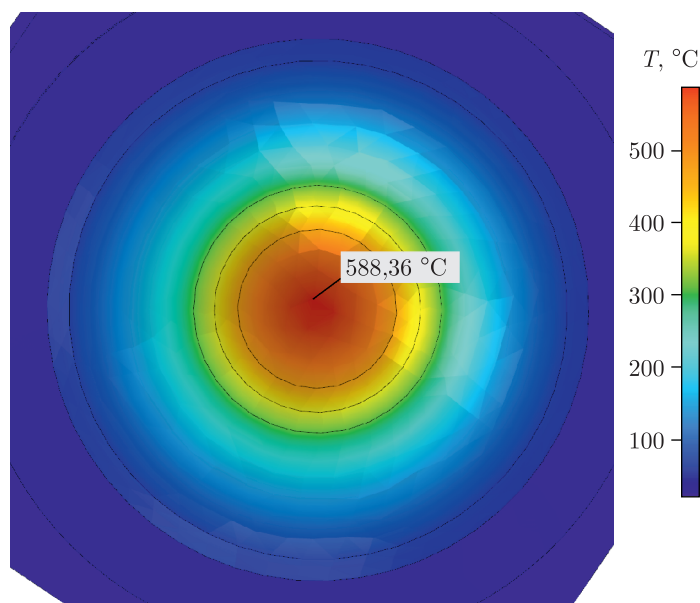


Рис. 5. Оценка поля температур для максимального проектного режима

Результаты, представленные на рис. 4 и 5, демонстрируют значительное превышение предельно допустимого значения механических напряжений, в несколько раз большего предела прочности материала мембраны для данной температуры. Поэтому, а также в связи со сложностью описания поведения материала мембраны в области вязкого разрушения результаты, полученные в этой области, не могут быть использованы как достоверные оценки.

На основании изложенных выше аргументов возникает необходимость проведения дополнительных исследований, представленных на рис. 6 в виде калибровочной шкалы и направленных на ограничение параметров электронного пучка, с целью недопущения превышения предельно допустимой температуры мембраны, а также перехода ее НДС в область вязкого разрушения и, как следствие, обеспечения надежной работы установки.

Проведенное многовариантное численное моделирование с использованием разработанной расчетной модели канала транспортировки позволило оценить области безопасной ( $\sigma \leq \sigma_{0,2}$ ) и допустимой ( $\sigma_{0,2} < \sigma \leq \sigma_{\text{в}}$ ) эксплуатации, а также область вязкого разрушения мембраны выпускного окна ускорителя ( $\sigma_{\text{в}} < \sigma$ ). Продемонстрированные на рис. 6 результаты также указывают на наличие слабой зависимости максимальной температуры мембраны от интенсивности конвективного теплообмена с ее поверхности, которая становится неразличимой начиная с коэффициента теплоотдачи — 50 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Таким образом, согласно рис. 6 при мощности энерговыделения в мембране до 11 Вт не ожидается структурных изменений конструкционной стали с последующей релаксацией при остывании. При мощности энерговыделения в мембране в интервале от 11 до 23 Вт возможны значительные структурные изменения конструкционной стали, а также изменение геометрии мембраны без нарушения

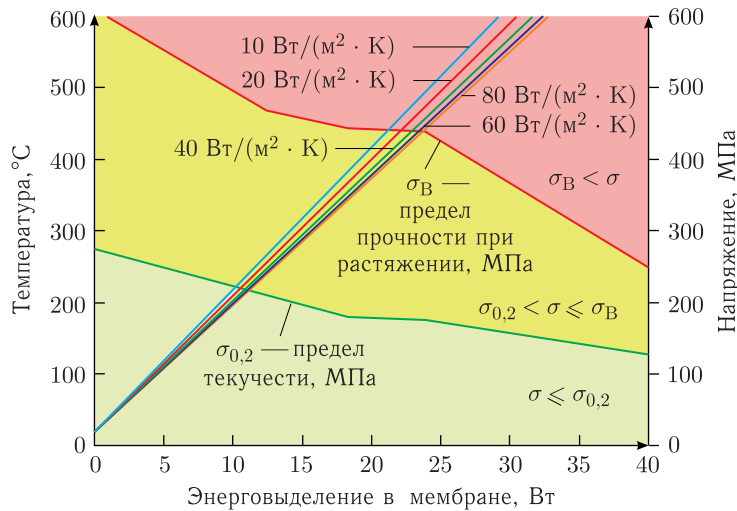


Рис. 6. Калибровочная шкала

целостности. Не рекомендуется переходить на уровень мощности энерговыделения в мембране сверх 23 Вт, так как это может привести к необратимым структурным изменениям конструкционной стали и нарушению целостности мембраны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы на основании проведенного многовариантного численного моделирования с использованием расчетных моделей разработана методика экспресс-оценки температурных полей на мембране выпускного окна ускорителя ЛУЭ-200, позволяющая быстро выполнить консервативную оценку ее надежности при возможном переходе на более высокую среднюю мощность пучка.

Также авторами рассмотрен максимальный проектный режим работы установки, эксплуатационные характеристики которого значительно превосходят максимально допустимые значения для конструкционной стали мембраны, что неизбежно приводит к необходимости ограничения параметров электронного пучка с целью недопущения возможных серьезных аварий. Как следствие, проведена оценка областей безопасной и допустимой эксплуатации, а также оценена область вязкого разрушения мембраны выпускного окна ускорителя, при которой она утрачивает свою целостность.

Продемонстрированные результаты, включающие в себя оценки поля температур и НДС, позволяют судить о возможности использования текущей геометрической конфигурации канала транспортировки при условии непревышения полного энерговыделения в мембране сверх 23 Вт.

Для достижения более высоких значений средней мощности пучка потребуются проведение дополнительных исследований, направленных на модернизацию существующего оборудования и поиск новых решений конструкции мембранного узла, способных выдержать возможные атмосферные и температурные нагрузки.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозеров А. В., Бечер Ю., Булычева Ю. К. и др. Физический пуск установки ИРЕН // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 923–932.
2. Бечер Ю., Голубков Е. А., Егоров В. А. и др. Ускоритель ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Состояние и развитие // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 5(189). С. 1029–1039.
3. Голубков Е. А., Кобец В. В., Минашкин В. Ф. и др. Первые результаты наладки второй ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Сообщ. ОИЯИ Р9-2017-77. Дубна, 2017.
4. Ferrari A., Sala P. R., Fasso A., Ranft J. FLUKA: A Multi-Particle Transport Code. CERN-2005-10. 2005. INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773.
5. ANSYS Discovery Live. <https://cae-club.ru>.