

РАСЧЕТ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПРОТОТИПА НЕЙТРОНОПРОИЗВОДЯЩЕЙ МИШЕНИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Е.В. Рудычев, С.И. Прохорец, Д.В. Федорченко, М.А. Хажмурадов
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

Рассмотрена возможность экспериментальной проверки эксплуатационных параметров мишени. Данные условия реализованы на прототипе мишени, который может эксплуатироваться на базе ускорителя электронов КУТ-30 с энергией пучка до 35 МэВ. Проведено математическое моделирование энерговыделения в прототипе мишени. Показано, что при соответствующих параметрах в прототипе мишени существуют зоны с энерговыделением, эквивалентным энерговыделению в реальной мишени.

1. ВВЕДЕНИЕ

Новый источник нейтронов, основанный на подкритической сборке, управляемой ускорителем электронов, проектируется в Харьковском физико-техническом институте. Нейтронопроизводящая мишень является наиболее важной частью проектируемой установки. Мишень работает в достаточно тяжелых условиях с энергией пучка до 150 МэВ и средней мощностью пучка 100 кВт. Импульсный режим работы ускорителя может приводить к дополнительным термомеханическим напряжениям в мишени. Для обеспечения безопасной работы установки источника нейтронов при проектировании необходимо учитывать возможные термические и термомеханические нагрузки. В работе рассмотрена возможность экспериментальной проверки эксплуатационных параметров мишени. Данные условия могут быть реализованы на прототипе мишени, который может эксплуатироваться на пучке более низких энергий, например, на базе ускорителя электронов КУТ-30 с энергией пучка до 35 МэВ.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА МИШЕНИ

Так как характеристики ускорителя КУТ-30 существенно отличаются от характеристик ускорителя, разрабатываемого для реальной мишени, необходимо разработать прототип мишени таким образом, чтобы результирующие термомеханические напряжения в реальной мишени и в прототипе были эквивалентны. Критерием моделирования была выбрана удельная мощность пучка, подобранная в соответствии с удельной мощностью пучка для реальной мишени. Исходя из этого критерия, диаметр пучка был выбран 1,2 см, а диаметр мишени – 1,25 см (пучок должен быть немного меньше диаметра мишени). Удельная мощность пучка для прототипа мишени составила 2,2 кВт/см².

Исходя из технических требований, была выбрана геометрия мишени, приведенная на Рис.1.

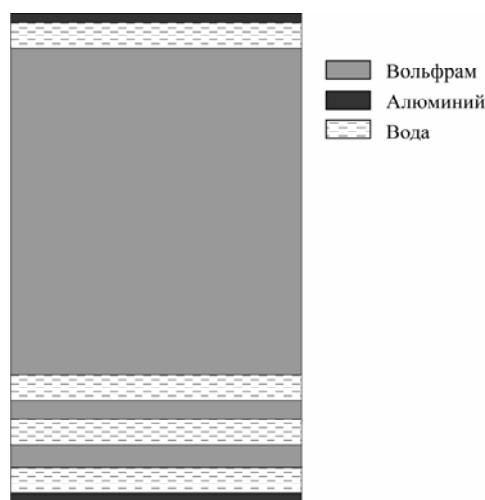


Рис.1. Вариант геометрии мишени

Мишень представляет собой 3 вольфрамовых диска различной толщины, между которыми находится вода. Моделирование алюминия было проведено с целью учета оболочки мишени. С учетом технических особенностей толщины вольфрамовых дисков следующие: первый и второй диски – 2 мм, третий диск – 28 мм. Толщина водяных каналов 2 мм. Толщина алюминиевой оболочки 1 мм.

Расчеты энерговыделения в мишени проведены методом Монте-Карло при помощи двух независимых пакетов: MCNPX и PENELOPE [1,2].

Для предварительного анализа было рассчитано энерговыделение по глубине для вольфрамовой мишени при первичной энергии электронов 35 и 150 МэВ (Рис.2). Исходя из проведенных расчетов, можно сказать, что удельная энергетическая нагрузка на отдельные элементы мишени в случае пучка 35 МэВ будет значительно выше, так как почти вся энергия пучка будет выделяться в слое 7...8 мм, в отличие от случая 150 МэВ, где энерговыделение распределено до глубины 25...30 мм.

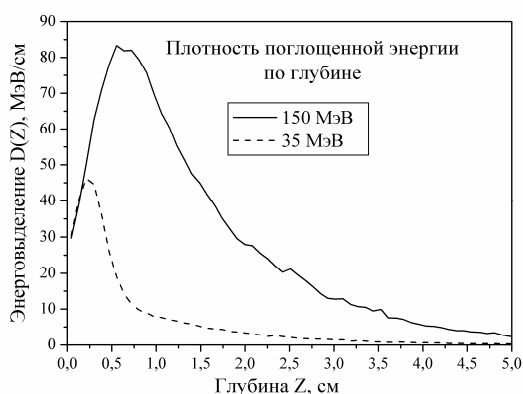


Рис.2. Энерговыведение для вольфрама

Для данной геометрии мишени и энергии пучка 35 МэВ была рассчитана плотность поглощенной энергии по глубине (Рис.3).

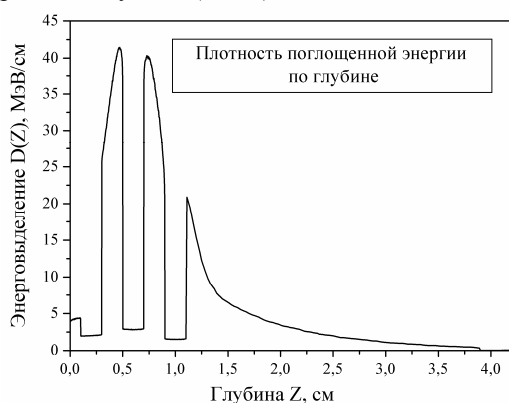


Рис.3. Энерговыведение для вольфрама с учетом геометрии мишени

Общая выделяемая мощность в мишени составила порядка 7,5...7,7 кВт.

Далее были проведены детальные расчеты мощностей для каждого отдельного блока мишени, включая каналы охлаждения и алюминиевую оболочку. Данные по выделенной мощности в мишени представлены в Табл.1.

Таблица 1

Удельное энерговыведение для элементов геометрии мишени

Наименование блока мишени	Выделенная мощность, Вт	
	MCNPX	PENELOPE
Алюминиевый диск №1	130	127,5
Водяной канал №1	124	121,6
Вольфрамовый диск №1	2029	2126
Водяной канал №2	170	172
Вольфрамовый диск №2	1938	2095
Водяной канал №3	90,2	92
Вольфрамовый диск №3	2521	2938
Водяной канал №4	0,82	0,9
Алюминиевый диск №2	0,84	0,9

На Рис.4. приведено удельное распределение мощности в мишени. Данные проведенных расчетов можно использовать для решения термогидравлической задачи по условиям охлаждения мишени. Детально рассматривался второй, наиболее энергона-

пряженный диск. Весь диск разбит на 5 частей: 2 боковые шириной 0,25 см полной высоты, центральная часть разбита на три части по высоте: верхняя и нижняя по 0,5 мм и центральная 1 мм (Рис.5).

Для центральной части задано энерговыведение 2500 Вт/см³, для остальных четырех – 1500 Вт/см³. Скорость воды не менее 7 м/с. Распределение температуры для наиболее энергонапряженного диска мишени приведено на Рис.6.

Одной из задач прототипа мишени является изучение механико-термических напряжений под воздействием пучка электронов. Следовательно, критерием соответствия реальной мишени и прототипа будет не удельная мощность пучка, а удельное распределение энерговыведения в объеме мишени. Из расчетов для реальной мишени максимальное удельное энерговыведение в объеме мишени было около 1 кВт/см³. Поэтому для решения термогидравлической задачи мы получаем консервативные результаты для условий охлаждения мишени, несмотря на грубую разбивку мишени по зонам с различным энерговыведением.

Для получения характеристик энерговыведения в объеме прототипа мишени в пределах до 1 кВт/см³ возможны 2 принципиально разных подхода: первый – увеличение площади прототипа, второй – уменьшение тока пучка. В рамках первого подхода было рассмотрено 2 варианта прототипа с диаметром 40 и 50 мм.

В связи с тем, что значение тока не изменяется, следовательно, и выделенная мощность в прототипе не изменяется. Однако в связи с увеличением диаметра прототипа мишени изменяется плотность выделенной энергии на 1 см³. Были проведены расчеты для мишени с диаметрами 40 и 50 мм. Данные энерговыведения для 40 мм мишени представлены на Рис.7.

Для реальной мишени удельное распределение удельного выделения было показано специалистами Аргонской национальной лаборатории [3]. Сравнение выделенной мощности реальной мишени с нашими расчетами представлено на Рис.8.

Расчеты показали, что энерговыведение во втором и третьем диске реальной мишени коррелирует с энерговыведением в первом и втором диске прототипа.

Далее рассмотрим вариант расчета энерговыведения при уменьшении тока пучка. В этом случае возможно оставить первый вариант мишени диаметром 25 мм и, соответственно, уменьшить ток пучка до 100 мкА.

Проведенные расчеты показывают соответствующее уменьшение выделенной мощности в мишени и приведены в Табл.2. Удельное энерговыведение в мишени представлено на Рис.9. Сравнение данной конфигурации прототипа и реальной мишени представлено на Рис.10.

Здесь аналогично получаем, что энерговыведение во втором и третьем диске реальной мишени коррелирует с первым и вторым диском прототипа мишени.

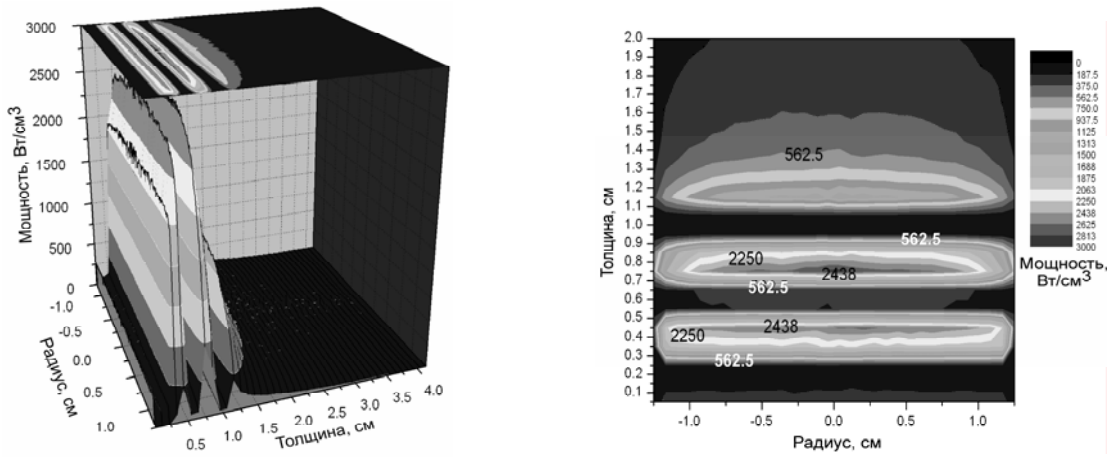


Рис.4. Удельное энерговыделение для системы мишени с учетом каналов охлаждения

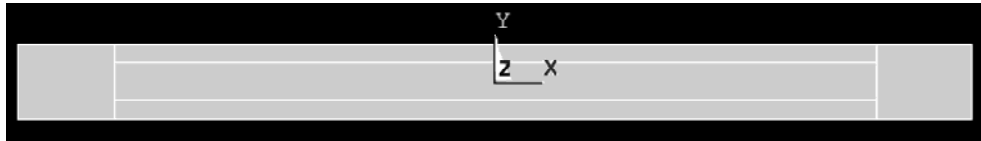


Рис.5. Модель для решения термогидравлической задачи

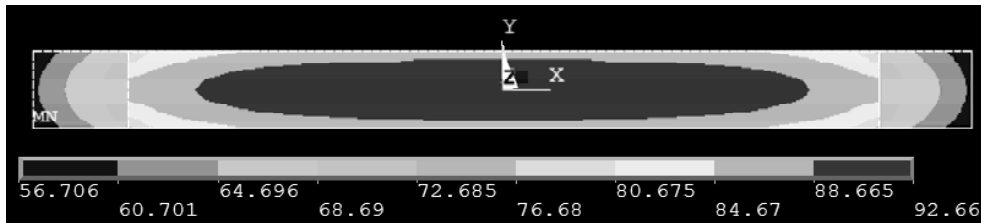


Рис.6. Распределение температуры для наиболее энергонапряженного диска мишени

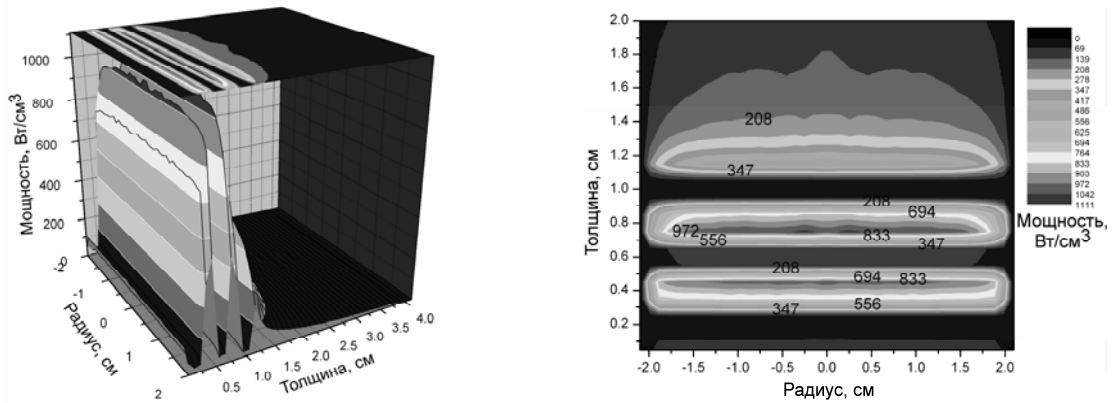


Рис.7. Удельное энерговыделение системы прототипа мишени диаметром 40 мм

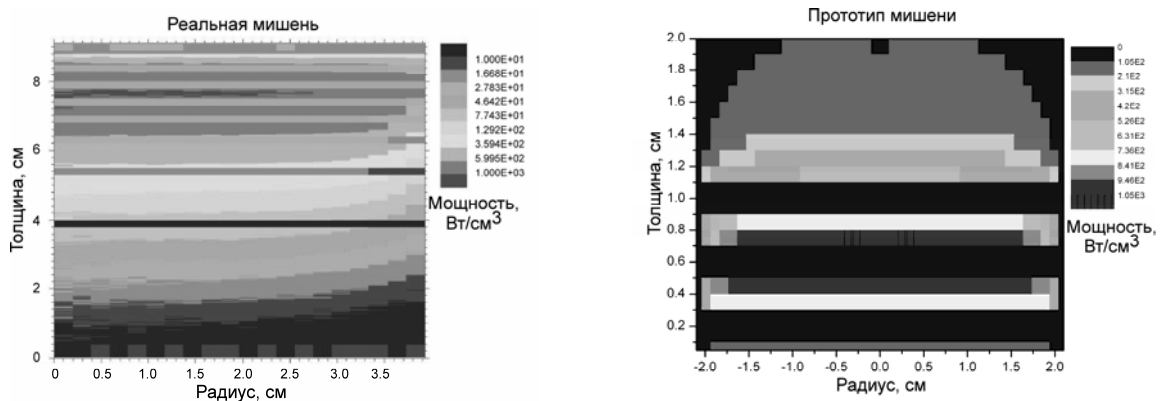


Рис.8. Сравнение энерговыделения прототипа диаметром 40 мм и реальной мишени

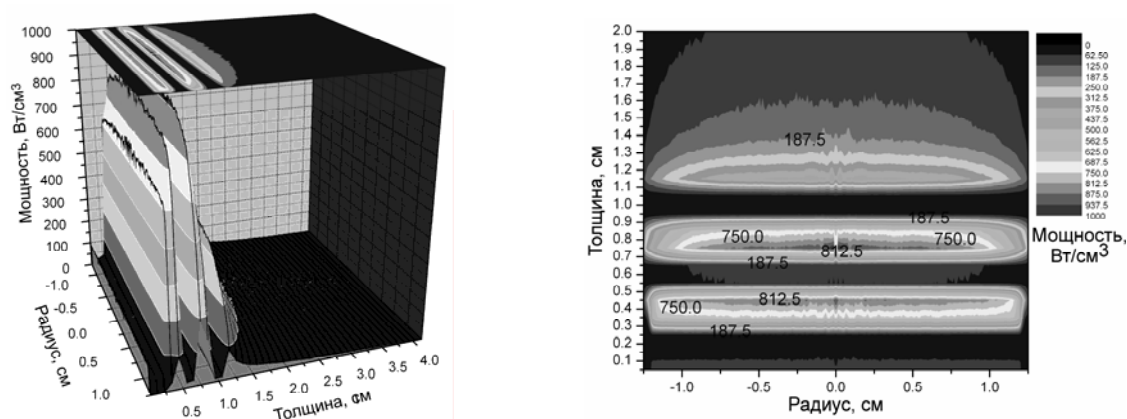


Рис.9. Удельное энерговыделение системы мишени диаметром 25 мм с мощностью пучка 100 мкА

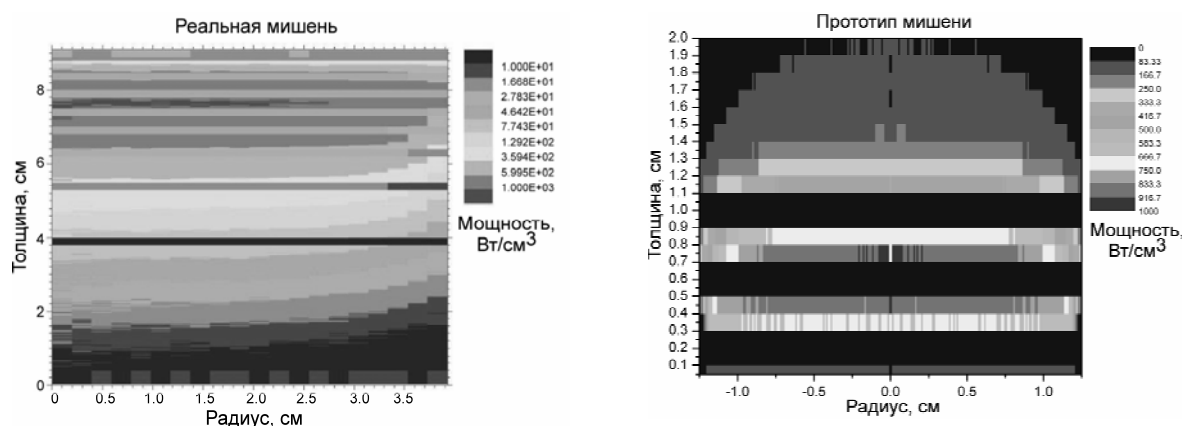


Рис.10. Сравнение энерговыделения прототипа диаметром 25 мм при токе 100 мкА и реальной мишени

Таблица 2

Удельное энерговыделение для элементов геометрии мишени при токе пучка 100 мкА

Наименование блока мишени	Выделенная мощность, Вт	
	MCNPX	PENELOPE
Алюминиевый диск №1	43,6	42,5
Водяной канал №1	41,4	40,5
Вольфрамовый диск №1	676,5	708,7
Водяной канал №2	56,6	57,3
Вольфрамовый диск №2	646	698,3
Водяной канал №3	30,1	30,7
Вольфрамовый диск №3	840,3	979,3
Водяной канал №4	0,27	0,3
Алюминиевый диск №2	0,28	0,3

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТОТИПА МИШЕНИ

1. Показана принципиальная возможность создания прототипа мишени с характеристиками энерговыделения аналогичными характеристикам, полученным для реальной мишени.

2. Проведено моделирование энерговыделения для прототипа мишени и рассмотрены варианты прототипов мишени с соответствующими параметрами.

3. Проведено моделирование распределения энерговыделения в объеме мишени с учетом краевых эффектов выноса энергии тормозным излучением

и с учетом каналов охлаждения и алюминиевой оболочки.

4. Рассчитаны мощности как для каждого объекта мишени, так и для всего комплекса в целом.

5. С целью дополнительной верификации результатов моделирования было проведено методом Монте-Карло на базе двух независимых пакетов: MCNPX 2.4.0 и PENELOPE 2006.

6. Получены предварительные данные для условий охлаждения мишени.

Вероятно, для более детального моделирования, непосредственно при создании прототипа, наиболее эффективной методикой будет вариация тока пучка ускорителя в зависимости от характеристик пространственного распределения пучка и окончательно выбранного варианта геометрии мишени, так как данная вариация позволит максимально приблизиться к характеристикам реальной мишени. К тому же вариация тока пучка технически проще реализуема, чем вариация геометрии прототипа мишени. Необходимо также отметить, что данные Аргонской национальной лаборатории для энерговыделения в объеме мишени были получены для случая плоскопараллельного пучка электронов, соответственно моделирование прототипа мишени также было проведено с учетом данного приближения.

В дальнейшем планируется провести моделирование мишени с учетом реального распределения пучка электронов как для реальной мишени, так и для прототипа.

ВЫВОДЫ

При помощи математического моделирования, основанного на методе Монте-Карло, были рассчитаны характеристики прототипа мишени и пучка ускорителя таким образом, что энерговыделение в прототипе мишени при эксплуатации его на ускорителе КУТ-30 будет соответствовать энерговыделению в мишени, которая будет эксплуатироваться на высокоточном ускорителе с энергией 150 МэВ.

Данные по энерговыделению позволяют сделать вывод о соответствии термомеханических напряжений в прототипе и в реальной мишени. Таким образом, существует возможность провести испытания свойств мишени, используя ускоритель КУТ-30, что позволит экспериментально проверить характеристики материала мишени на этапе проектирования высокоточного ускорителя.

Авторы выражают особую благодарность Солдатову С.А. за предоставленные термогидравлические расчеты, а также Лукьяновой В.П. за помощь в оформлении статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *MCNP 2.4.0. RSICC computer code collection. Monte-Carlo N-Particle Transport Code System for multiparticle and higt energy application.* CCC-715, 2002.
2. *Penelope-2006: ACode System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. Workshop Proceedings.* Barcelona, Spain 4-7 July 2006.
3. Yousry Gohar, Igor Bolshinsky, et al. Accelerator-driven subcritical facility: Conceptual design development // *Nucl. Inst. and Methods in Physics Research.* 2006, A562, p.870-874.

Статья поступила в редакцию 09.09.2009 г.

THE ENERGY DEPOSITION CALCULATION OF NEUTRON SOURCE TARGET PROTOTYPE FOR EXPERIMENTAL STUDIES OF OPERATIONAL PARAMETERS OF NEUTRON SOURCE FACILITY

Y.V. Rudychev, S.I. Prokhorets, D.V. Fedorchenko, M.A. Khazhmuradov

Possibility of experimental studying of neutron source target operational parameters is considered. This prototype can work under lower electron beam energies. For example, KUT-30 acceleration facility with 35 MeV electron beam is suitable for such purpose. We provide an extensive mathematical simulation of energy deposition in the prototype target. Results indicate that in prototype there are areas with energy deposition equivalent to real target one.

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОВИДІЛЕННЯ ПРОТОТИПУ НЕЙТРОНОУТВОРЮЮЧЕЙ МІШЕНІ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ПЕРЕВІРКИ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЖЕРЕЛА НЕЙТРОНІВ

Є.В. Рудичев, С.І. Прохорець, Д.В. Федорченко, М.А. Хажмурадов

Розглянуто можливість експериментальної перевірки експлуатаційних параметрів мішені. Дані умови реалізовані на прототипі мішені, який може експлуатуватися на базі прискорювача електронів КУТ-30 з енергією пучка до 35 МеВ. Проведено математичне моделювання енерговиділення в прототипі мішені. Показано, що при відповідних параметрах в прототипі мішені існують зони з енерговиділенням, еквівалентним енерговиділенню в реальній мішені.