

УДК 536.24

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА КОНТЕЙНМЕНТ ПРИ ВНЕКОРПУСНОМ ПАРОВОМ ВЗРЫВЕ НА АЭС С ВВЭР

Блинков В.Н., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Давыдов М.В., Парфенов Ю.В., Ртищев Н.А., Тарасов А.В., Гудеменко Д.В., Климов П.С.

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, e-mail: parfenov@erec.ru

Статья посвящена анализу парового взрыва в шахте реакторной установки. В расчетах использовалась геометрия шахты, типичная для реакторов корпусного типа с водой под давлением и начальные условия, характерные для тяжелых аварий этих реакторов. Были выполнены три расчета парового взрыва в шахте реактора, соответствующие различным начальным условиям. Первый расчет был базовый, во втором расчете было уменьшено количество воды в шахте, а третий расчет был выполнен с уменьшенным количеством (по сравнению с первым расчетом) истекающего из разрыва корнума. Основным результатом состоит в том, что получено существенное снижение силы парового взрыва при уменьшении количества воды в шахте. Это дает основание для анализа возможности организации так называемой «мокрой» ловушки, то есть слоя воды в шахте, который будет обеспечивать эффективный теплоотвод от упавшего туда корнума.

Ключевые слова: паровой взрыв, многофазные среды, математическая модель, тяжелая авария, АЭС с ВВЭР

DYNAMIC LOADS ON THE CONTAINMENT UNDER EX-VESSEL VAPOR EXPLOSION AT NPP WITH VVER

Blinkov V.N., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Davydov M.V., Parfenov Y.V., Rtishev N.A., Tarasov A.V., Gudemenko D.V., Klimov P.S.

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, e-mail: parfenov@erec.ru

Ex-vessel steam explosion in the reactor cavity is investigated in the paper. The cavity geometry typical for pressurized water reactors and initial conditions typical for severe accidents at these reactors are used in the calculations. Three calculations of the ex-vessel steam explosion in the reactor cavity appropriated for different initial conditions were carried out. The first calculation was the basic one, the amount of water in the cavity was reduced in the second calculation, the reduced amount of the corium discharged from the break (in comparison with the 1st calculation) was used in the 3rd calculation. The main result of the calculation is that the significant decreasing of the steam explosion power with the decreasing of the amount of the water in the cavity was observed in the calculation. This result leads to the analysis of the possibility of the construction so-called «wet» trap, that is the water layer in the cavity which provides effective heat transfer from the corium in the trap.

Keywords: steam explosion, multiphase medium, mathematical model, severe accident, NPP with VVER

Одной из стадий развития запроектной аварии на АЭС с ВВЭР является взрывное взаимодействие высокотемпературного расплава корнума с водой (паровой взрыв), потенциально способное привести к значительным разрушением контейнента [7–8]. Это явление сопровождается сложными гидродинамическими и теплофизическими процессами: дробление струй и капель расплава, теплообмен между высокотемпературным корнумом и водой, переход воды в сверхкритическое состояние, образование и распространение ударных и взрывных волн. Описание всех этих процессов и явлений требует создания сложных математических моделей, основанных на методах механики многофазных сред, использования современных численных схем и проведения верификации на экспериментальных данных. Адекватное моделирование парового взрыва необходимо, в первую очередь, для оценки возможных последствий, с точки зрения воздействия на контеймент, и выработки мер по управлению запроектной аварией.

Цель работы: определение динамических нагрузок на стенки шахты реактора ВВЭР при внекорпусном паровом взрыве в зависимости от уровня воды в шахте и массы поступающего корнума.

Материал и методы исследования

В расчетах использовалась геометрия шахты, типичная для реакторов корпусного типа с водой под давлением (типа ВВЭР и PWR) и начальные условия, характерные для тяжелых аварий этих реакторов.

Шахта реактора (цилиндрический сосуд высотой 4 м и диаметром 5,5 м) была частично заполнена водой (рис. 1). Уровень воды Н находился в диапазоне 1–3 м. Диаметр отверстия истечения в днище корпуса реактора был равен 1 м, температура истекающего корнума – 2900 К, начальное давление во всех расчетах было равно 0,1 МПа.

Для расчета взаимодействия высокотемпературного корнума с водой в ходе тяжелой аварии на АЭС авторами разработан программный комплекс VAPEX. В соответствии с последовательными стадиями парового взрыва программный комплекс VAPEX состоит из двух частей:

1) VAPEX-P предназначен для анализа процесса взаимодействия струи (или капель) расплава с водой

(фрагментации струи и перемешивания образующихся капель расплава с пароводяной смесью);

2) VAPEX-D служит для расчета взрывной стадии и определения динамических нагрузок на стен-

ки контейнента, в качестве начальных условий для VAPEX-D используются распределения параметров после перемешивания расплава с водой, полученных кодом VAPEX-P.

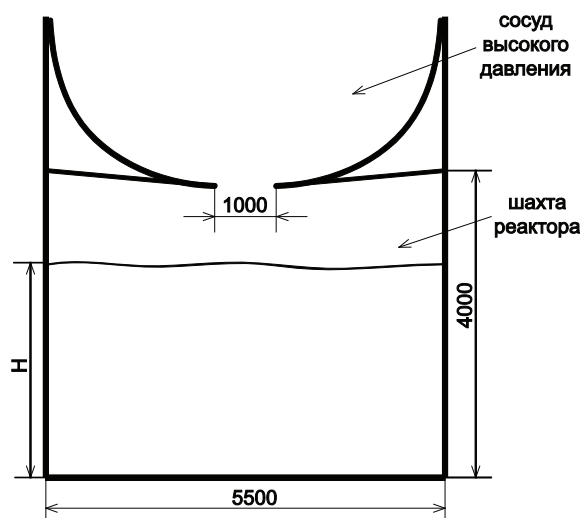


Рис. 1. Схема нижней части сосуда высокого давления и шахты реактора

Математическая модель кода VAPEX основана на использовании методов механики многофазных сред: выделяются фазы, характерные для рассматриваемой ситуации (например, вода, пар, капли расплава и т.п.), для которых формулируются уравнения сохранения массы, импульса и энергии, дополненные соотношениями, описывающими процессы межфазного обмена. Для описания каждой фазы вводятся следующие характеристики: давления, объемные доли, температуры, плотности, удельные внутренние энергии и скорости. Используется общепринятое предположение о равном давлении для всех фаз. Движение рассматривается в осесимметричном приближении. Подробное описание кода VAPEX и результатов его верификации на экспериментальных данных приведено в [1–6].

Чтобы оценить максимальные последствия парового взрыва, в расчетах предполагалось, что инициирование взрыва происходит в момент удара струи кориума о днище шахты, когда область перемешивания кориума с водой уже достаточно большая, но при этом объемная доля пара еще не настолько велика, чтобы существенно снизить эффективность взрыва.

Расчетная область представляла собой цилиндр с твердыми непроницаемыми границами. Во всех расчетах использовалась разностная сетка с шагом 10 см по каждому направлению. Величина временного шага составляла 10^{-4} с при расчете процесса перемешивания и 10^{-6} с при расчете взрывного взаимодействия. Триггер моделировался заданием начального повышенного давления (10 МПа) в центральной нижней расчетной ячейке.

Результаты исследования и их обсуждение

Расчет с начальным уровнем воды 3 м. Предполагалось, что в начальный момент в шахте находится слой воды с уровнем 3 м. (недогрев 10 К). Процесс предварительного перемешивания расплава с водой

протекает следующим образом: ускоряясь под действием силы тяжести, струя расплава входит в воду и увлекает ее за собой. В воде в области струи расплава образуется воронка, летящие здесь капли расплава испытывают меньшее сопротивление, чем передние капли, падающие в воде, и догоняют их. В результате капли концентрируются в головной части струи. Возникающие вихревые течения воды формируют характерную чашеобразную форму головной части струи. В момент достижения передней частью струи расплава основания шахты предполагался триггер парового взрыва, который моделировался заданием повышенного давления (100 атм.) в центральной нижней расчетной ячейке. Возникающая в результате триггера волна сжатия вызывает фрагментацию капель расплава и инициирует взрывное взаимодействие расплава с водой. На рис. 2 представлен процесс распространения волны термической детонации и последующего расширения продуктов взрыва, показаны поля давления и объемного паросодержания, а также скорости воды и пара в последовательные моменты времени. В начальный период своего развития (рис. 2а) волна термической детонации распространяется по головной части струи расплава, где высокая концентрация капель расплава сочетается с наличием достаточного количества воды, тем самым создавая благоприятные условия для парового взрыва. Давление в этой области возрастает до 250 МПа. Затем волна термической детонации начинает распространяться вверх по периферийной части струи

расплава, где присутствует вода. Отметим, что в центральной области, заполненной паром, взрывное превращение не идет. Рост

давления в зоне взрывного взаимодействия генерирует волны давления в окружающей воде, движущиеся к границам области.

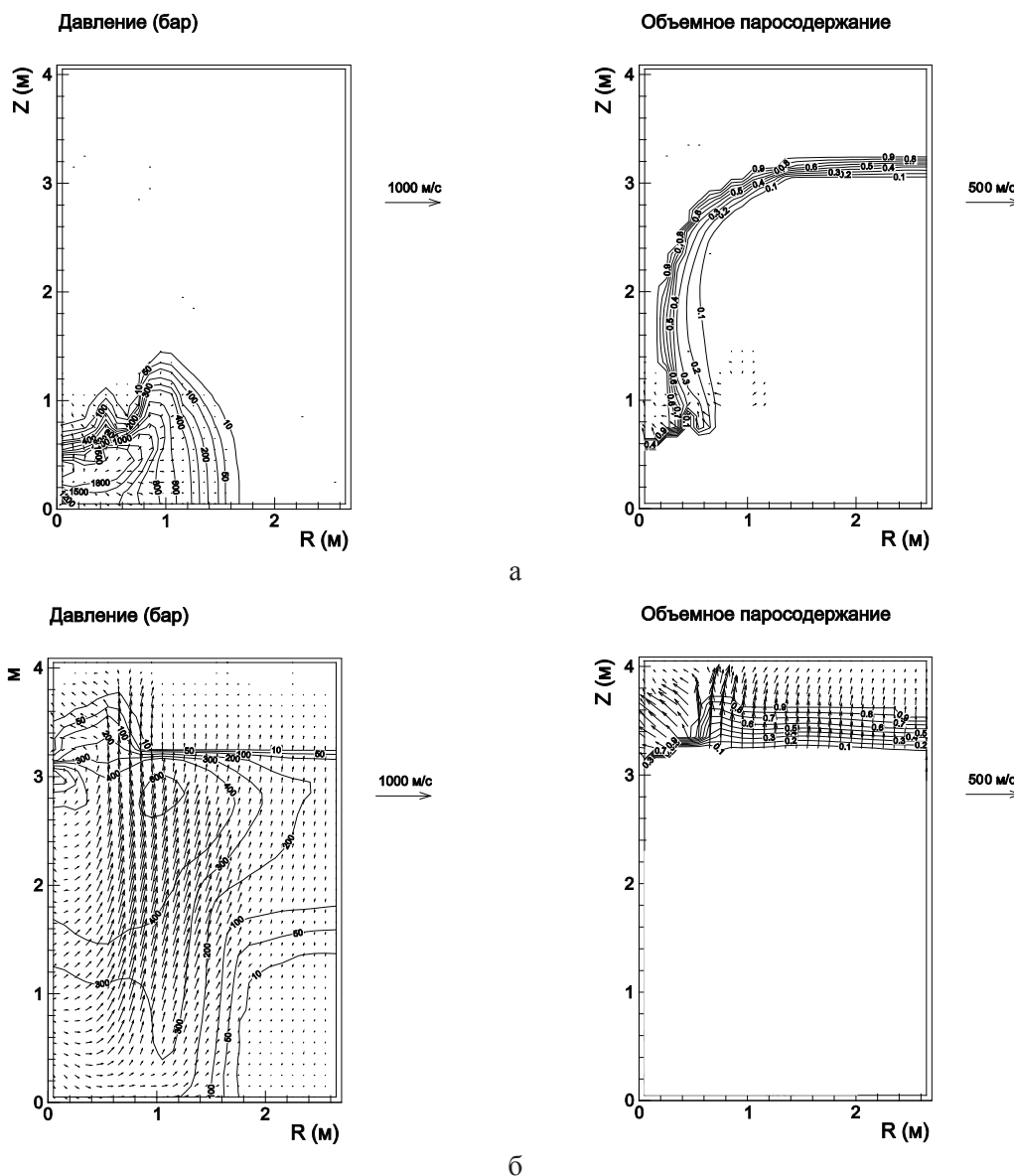


Рис. 2. Давление, скорость воды и объемное паросодержание, скорость пара в моменты времени: а – $t = 0,8$ мс; б – $t = 5,0$ мс

По мере продвижения волны термической детонации вверх паровая воронка схлопывается. Расплав в центральной области начинает покрываться водой и там, в момент времени 2 мс, происходит вторичный паровой взрыв, который повышает давление вблизи оси симметрии до 350 МПа, а волна термической детонации распространяется вплоть до поверхности раздела пар-вода. Подойдя к поверхности раздела, зона максимального давления как бы застывает вблизи этой поверхности и происходит постепенное снижение давления (рис. 2б).

Расчет с начальным уровнем воды 1 м. Этот вариант отличается от предыдущего тем, что уровень воды в шахте был уменьшен до 1 м. Предварительное перемешивание расплава с водой в этом случае происходит аналогично предыдущему за исключением того, что теперь струя расплава проходит по воде расстояние только 1 м, вследствие чего в воде развивается менее интенсивное вихревое течение, которое не успевает существенно деформировать струю. Развитие парового взрыва в образовавшейся смеси расплава с водой проис-

ходит следующим образом. После срабатывания триггера в течение очень быстрого времени (1 мс) взрывное взаимодействие охватывает практически всю область, где находится смесь расплава с водой, причем давление здесь достигает 400 МПа. Из-за отсутствия воды в верхней части струи капель расплава волна взрывного взаимодействия туда не перемещается. Из зоны взрывного взаимодействия в окружающую воду генерируются волны давления, которые движутся к границам области и отражаются от них. Под действием высокого давления вода и продукты взрыва начинают двигаться вверх, при этом давление в области снижается. Начиная с момента времени $t = 2,2$ мс в воде, граничащей с зоной взрывного взаимодействия, давление падает, и она вскипает. Со временем эта область вскипающей воды увеличивается.

Расчет с уменьшенным расходом кориума в струе. Вышеприведенные варианты соответствуют большому расходу кориума из корпуса реактора, когда плавится практически вся активная зона. Ниже рассмотрен

случай, когда разрушение днища корпуса происходит достаточно рано, и выливается мало кориума – расход вытекающего кориума был в 10 раз меньше, чем в предыдущих расчетах. Недогрев воды в данном случае был 80 К, начальный уровень – 3 м. Развитие парового взрыва в этих условиях в целом напоминает предыдущие варианты. Зона образовавшейся смеси расплава с водой доходит до уровня, поэтому наблюдается быстрое распространение волны термической детонации от места триггера до уровня. При этом в окружающей воде взрывная зона генерирует волны давления, движущиеся к границам шахты. Дойдя до границы раздела, волна детонации «зависает», и начинается формирование движения продуктов взрыва и окружающей воды под действием высокого давления. К моменту $t = 4,5$ мс поднимающаяся масса достигает верхней границы, и начинается ее растекание вдоль этой границы.

На рис. 3 показано распределение импульса давления вдоль боковой стенки шахты для трех рассмотренных вариантов.

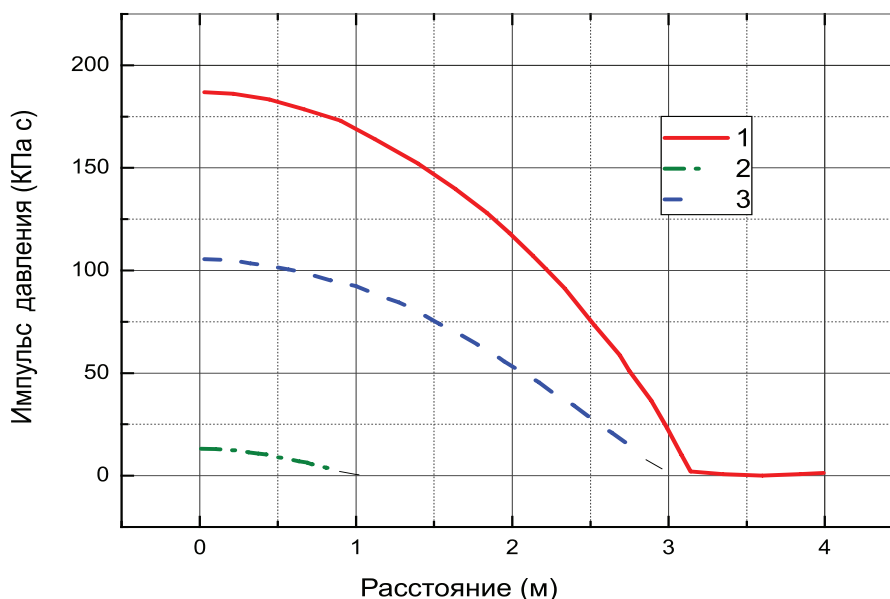


Рис. 3. Распределение импульса давления вдоль боковой стенки шахты:
1 – уровень воды 3 м ($t = 5$ мс); 2 – уровень воды 1 м ($t = 3,2$ мс);
3 – уменьшенная масса кориума ($t = 5,5$ мс)

Выводы

Проведенные расчеты парового взрыва в шахте реактора показали, что он при определенных условиях может представлять опасность для целостности шахты.

При отсутствии ловушки в шахте и при наличии достаточного количества воды в результате распада струи кориума, истекающей из корпуса, и смешения с водой образуется взрывоопасная смесь высоко-

температурных каплей расплава с водой. Под действием триггера возникает волна термической детонации, приводящая к динамическому нагружению стенок шахты до значений, при которых возможно разрушение шахты.

Сопоставительные расчеты при различных начальных уровнях воды в шахте выявили, что наиболее опасным с точки зрения воздействия на шахту будет паровой взрыв

при высоком уровне воды. Импульсы давления на боковые стенки отличаются более чем на порядок (180 кПа·с – уровень 3 м, 13 кПа·с – начальный уровень 1 м). Следует отметить, что воздействие на основание шахты в обоих случаях примерно одинаковое – около 400 кПа·с. Это связано с тем, что волны давления, генерируемые из зоны взрыва, проходят вниз, практически не ослабляясь, в то время как их распространение в поперечном направлении существенно ослабляется для малых уровней воды из-за разгрузки на поверхности раздела.

Расчет при уменьшенной массе вылившегося кориума показал, что и в этом случае паровой взрыв создает значительные нагрузки на стенки шахты. Импульсы давления на боковых стенках достигают 105 кПа·с, а на основании шахты – 260 кПа·с.

Таким образом, выполненный анализ показал, что при проливе расплавленного кориума в шахту реактора возникающий паровой взрыв оказывает значительные нагрузки на стенки, создавая угрозу ее целостности при высоком уровне воды в шахте (~ 3 м).

В то же время полученные результаты, демонстрирующие существенное снижение силы парового взрыва при уменьшении количества воды в шахте, дают основание для анализа возможности организации так называемой «мокрой» ловушки, то есть слоя воды в шахте, который будет обеспечивать эффективный теплоотвод от упавшего туда кориума. Один из основных вопросов при этом – недопустимость сильных паровых взрывов. Как показали проведенные расчеты, при уровне воды в шахте 1 м паровой взрыв не представляет угрозы для целостности контейнента. Таким образом, задача состоит в том, чтобы при развитии тяжелой аварии уровень воды в шахте был бы не очень высоким для устранения угрозы паровых взрывов.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по госконтракту №14.740.11.0093 от 08.09.2010.

Список литературы

1. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Соколин А.В. Взрывное взаимодействие расплава с водой. Моделирование кодом VAPEX-D // Теплофизика высоких температур. – 2002. – Т. 40. – № 3. – С. 466–474.
2. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В., Соколин А.В. Анализ эксперимента по взаимодействию расплава с охладителем на установке FARO с помощью кода VAPEX // Атомная энергия. – 2002. – Т. 92, Вып. 2. – С. 91–95.
3. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В. Численное моделирование процесса предварительного перемешивания струи расплава активной зоны с водой с помощью кода VAPEX-P // Теплоэнергетика. – 2003. – №11. – С. 35–39.

4. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Анализ крупномасштабных экспериментов по взаимодействию кориума с водой с помощью кода VAPEX // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45. – № 4. – С. 565–574.

5. Моделирование взаимодействия высокотемпературного расплава материалов активной зоны с теплоносителем / В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, С.Е. Якуш, В.Ф. Стрижов, А.Е. Киселев, Г.В. Кобелев // Известия РАН. Энергетика. – 2007. – №6. – С. 11–28.

6. Оценка ударного воздействия на корпус реактора вследствие внутрикорпусного парового взрыва / В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, Ю.В. Парфенов, Н.А. Ртищев, Е.М. Борковкова // Вестник МЭИ. – 2012. – №2. – С. 50–57.

7. Berthoud G. Vapor explosions // Annual Rev. Fluid Mech. – 2000. – P. 573–611.

8. Fletcher D. F., Anderson R. P. A review of pressure-induced propagation models of the vapour explosion process // Progress in Nuclear Energy. – 1990. – Vol. 23. – № 2. – P. 137–179.

References

1. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Sokolin A.V. Vzravnnoe vzaimodeistvie rasplava s vodoi. Modelirovanie s pomoshiu koda VAPEX-D – Teplofizika vusokih temperatur. 2002. Vol. 40. no. 3. pp. 466–474.

2. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Parfenov Y.V., Sokolin A.V. Analiz exrimenta po vzaimodeistviu rasplava s ohladitelem na ustanovke FARO s pomoshiu koda VAPEX – Atomnaya Energiya. 2002. Vol 92, vup. 2. pp. 91–95.

3. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Parfenov Y.V. Chislennoe modelirovanie processa predvaritelnogo peremeshivaniya strui rasplava aktivnoi zonu s pomoshiu koda VAPEX-P – Teploenergetika 2003. no. 11. pp. 35–39.

4. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. Analiz krupnomastabnih experimentov po vzaimodeistviu koriuma s vodoi s pomoshiu koda VAPEX – Teplofizika vusokih temperatur. 2007. Vol. 45. no. 4. pp. 565–574.

5. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E., Strizov V.F., Kiselev A.E., Koblelev G.V. Modelirovanie vzaimodeistviya vusokotemperaturnogo rasplava materialov aktivnoi zonu s teplonositelem // Izvestia RAN. Energetika 2007. no. 6. pp. 11–28.

6. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Parfenov Y.V., Rti-shev N.A., Borovkova E.M.. Ocenka udarnogo vzaimodeistviya na korpus reaktora vsledstvie vnutrikorpusnogo parovogo vzruva // Vestnik MEI 2012. no. 92, pp. 50–57.

7. Berthoud G. Vapor explosions // Annual Rev. Fluid Mech. 2000, pp. 573–611.

8. Fletcher D.F., Anderson R.P. A review of pressure-induced propagation models of the vapour explosion process // Progress in Nuclear Energy, 1990, vol. 23, no. 2, pp. 137–179.

Рецензенты:

Болтенко Э.А., д.т.н., начальник отдела нестандартных теплотехнических измерений ОАО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций» Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», г. Электрогорск;

Гашенко В.А., д.т.н., зам. директора по научной работе – начальник Управления НИР и НИОКР в области водной химии ОАО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций» Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», г. Электрогорск.

Работа поступила в редакцию 06.09.2012.