

УДК 621.039.743

А. А. Андрижиевский, доктор технических наук, профессор (БГТУ);**А. Г. Трифонов**, доктор технических наук, профессор (БГТУ);**Т. Ю. Пронкевич**, младший научный сотрудник (ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси)**ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА В БАСЕЙНЕ ВЫДЕРЖКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ИСПАРЕНИЯ**

Приведена модель для оценки процессов тепломассопереноса в бассейнах выдержки отработавшего ядерного топлива с различными уровнями заполнения водой и с учетом эффекта испарения. Вклад теплового потока вследствие поверхностного испарения может составлять заметную (до 20–30%) величину в суммарном теплосъеме, и его необходимо учитывать при анализе аварийных ситуаций и в первое время после выгрузки отработавшего ядерного топлива из активной зоны реактора. Результаты данной работы могут быть использованы для проведения анализа безопасности хранения отработавшего ядерного топлива в приреакторных бассейнах выдержки.

Provides a model for the assessment of processes of heat transfer in the basins of excerpts of spent nuclear fuel, with various levels of flooding and the effects of evaporation. To heat flow due to surface evaporation can be significant (up to 20–30%) the amount of total heat sink and must be taken into account in the analysis of accidents and for the first time after unloading spent nuclear fuel from the reactor. The results of this work can be used to analyze the security of storage of spent nuclear fuel in some reactor basins excerpts.

Введение. Хранение отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) является одним из завершающих этапов топливного цикла АЭС. Выгруженное из реактора ОЯТ первоначально направляется на хранение в бассейн выдержки (БВ) для снижения остаточного тепловыделения, а затем переводится на сухое хранение [1].

Сложность проблем обращения с ОЯТ связана с его высокой активностью, наличием в составе большого количества делящихся веществ и значительным тепловыделением после выгрузки из реактора.

Хранение ОЯТ должно обеспечивать снятие остаточного тепловыделения отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС), защиту персонала и окружающей среды от ионизирующего излучения и выхода радиоактивных веществ в окружающую среду, физическую защиту отработавшего топлива. Этим требованиям в полной мере отвечает хранение ОЯТ в водной среде («мокрый» способ хранения), при котором происходит снижение остаточного тепловыделения и распад наиболее активных короткоживущих радионуклидов, таких как йод-131, ксенон-133 и др. Необходимое для этого время составляет 1–3 года в зависимости от типа ядерного топлива [2].

Многолетний опыт «мокрого» хранения ОЯТ доказал его надежность и удобство, особенно для уменьшения уровня радиационных нагрузок и тепловыделения отработавшего топлива непосредственно после выгрузки из реактора [3, 4].

Бассейн выдержки (рис. 1) предназначен:

– для хранения отработавших тепловыделяющих сборок в целях спада их активности и остаточных тепловыделений;

– перегрузки выдержанных ТВС из БВ в транспортный контейнер;

– перегрузки свежих ТВС из чехла в бассейн выдержки или реактор;

– перегрузки отработавших ТВС из активной зоны реактора в стеллажи БВ;

– перегрузки свежих ТВС из стеллажей БВ в реактор.

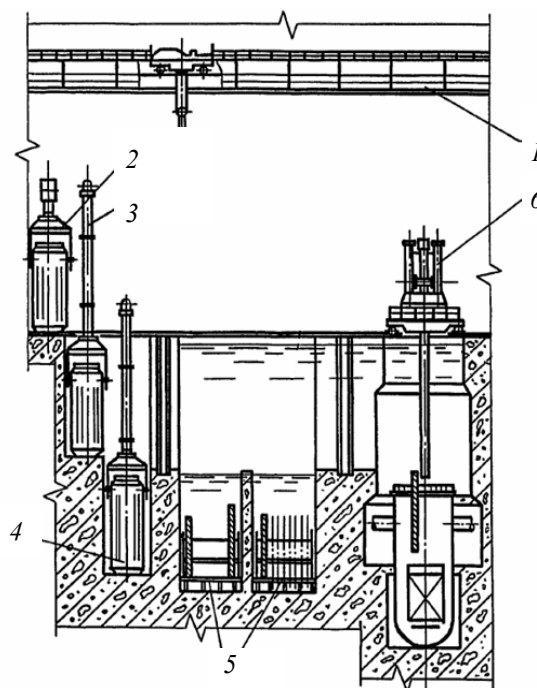


Рис. 1. Схема приреакторного бассейна выдержки отработавшего топлива ВВЭР-1000 [2]:

1 – круговой кран; 2 – траверса контейнера для ОЯТ; 3 – штанга для контейнера; 4 – транспортный контейнер; 5 – стеллажи БВ; 6 – перегрузочная машина

Для контроля состояния сборок во время хранения используются промышленные телевизионные установки. Косвенный контроль осуществляется

с помощью измерения удельной радиоактивности и анализа радиохимического состава воды. При плановой перегрузке топлива, для отвода тепла от ОТВС в приреакторном БВ имеется система охлаждения, которая периодически включается, поддерживая температуру воды в бассейне до 30°C. Максимальная температура воды в БВ не должна превышать 70°C при полной выгрузке ОТВС в бассейн выдержки из активной зоны реактора [2].

Отвод остаточных тепловыделений от ТВС, находящихся в БВ, осуществляется принудительной циркуляцией воды в отсеках БВ. Работающий насос расхолаживания БВ создает циркуляцию воды по замкнутому контуру. Насос подает воду в напорный трубопровод, откуда она попадает в напорный коллектор, по которому поступает в отсеки бассейна выдержки. Из БВ вода попадает в сливной трубопровод и поступает в теплообменник. Проходя по межтрубному пространству с многократным поперечным обтеканием трубного пучка, вода охлаждается до температуры $\leq 45^\circ\text{C}$, и циркуляция ее по контуру охлаждения БВ повторяется.

Постановка задачи исследования. При аварии на АЭС Фукусима бассейн выдержки (БВ) оказался ахиллесовой пятой АЭС, так как подавляющее большинство новых тепловыделяющих сборок (ТВС) находилось в БВ, а не в самом реакторе. В результате утечки и выкипания воды в БВ ТВС оголились и начали плавиться.

Безусловно, ОТВС излучают меньше тепла, чем новые сборки, но все-таки достаточно много, чтобы привести в условиях их неэффективного охлаждения в БВ к разогреву циркониевых оболочек стержней и, соответственно, к возможному разрушению их целостности. При этом в результате избыточного давления из-под оболочки ТВС начинают вырываться радиоактивные газы (например, пары йода-131), накопившиеся в стержнях за время их пребывания в реакторе.

В связи с вышеизложенным, обоснование безопасности «мокрого» хранения ОЯТ связано с внедрением в практику анализа эффективности систем охлаждения БВ надежных методик расчета их теплотехнических параметров. И, в частности, в аварийных ситуациях при возможном частичном или полном отключении принудительной циркуляции в контуре охлаждения.

Основой таких методик может служить численный аналог систем 2-D и 3-D нестационарных уравнений сохранения при начальных и граничных условиях, соответствующих реальным условиям хранения ОЯТ в БВ.

Подобные системы уравнений должны быть построены применительно к сложным пространственным геометрическим структурам и описы-

вать различные режимы теплоотвода с учетом как конвективного переноса, так и эффекта испарения.

Метод анализа. В данной работе в рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics разработан модельный аналог системы временного хранения и охлаждения ОЯТ в приреакторном БВ (рис. 2).

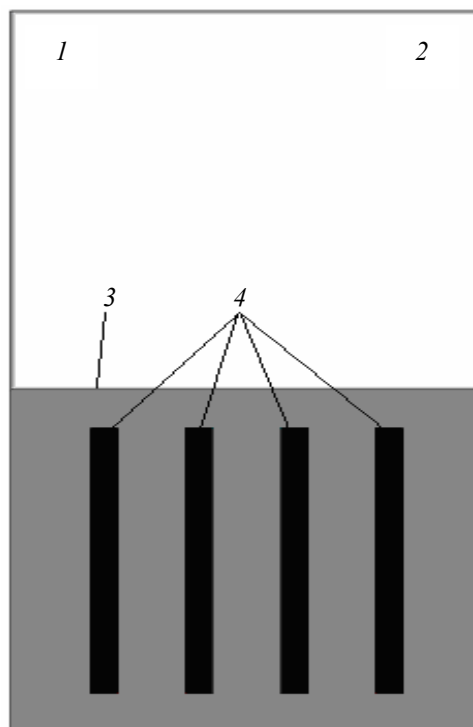


Рис. 2. Модельный аналог БВ:
1 – входной вентиляционный канал;
2 – выходной вентиляционный канал;
3 – уровень воды; 4 – ОТВС

При построении расчетной модели БВ приняты следующие основные допущения:

- 1) движение газовой фазы описывается в рамках двухкомпонентной паровоздушной смеси;
- 2) физические свойства воды и твердых сред принимаются постоянными, а свойства паровоздушной смеси – зависящими от температуры, давления и относительной влажности воздуха;
- 3) дно и стенки бассейна выдержки считаются теплоизолированными, и вынос теплоты осуществлялся, соответственно, только через вентиляционные каналы.

При этом учитывались два механизма теплоотвода: за счет конвекции и за счет испарения. Радиационный теплообмен не рассматривался.

Следовательно, общая модель описания процессов переноса строилась на основе решения нестационарных уравнений сохранения количества движения, массы и тепловой энергии в виде

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} - \nabla \left[\eta (\nabla U + (\nabla U)^T) \right] + \rho U \nabla U + \nabla P = 0,$$

$$\nabla U = 0, \quad \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla (\lambda \nabla T) + Q_V,$$

где ρ – плотность среды; U – скорость потока; η – коэффициент динамической вязкости; P – гидростатическое давление; T – температура; C_p – удельная теплоемкость; \vec{u} – вектор скорости; λ – коэффициент теплопроводности; Q_V – объемный тепловой источник. Верхний индекс T – турбулентная составляющая, определяемая согласно k- ϵ -модели турбулентности в интерпретации COMSOL Multiphysics.

Дополнительно решалось уравнение сохранения массы паровой фазы:

$$\frac{\partial c''}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla c'' = \nabla (D'' \nabla c''),$$

где c'' – концентрация пара, D'' – коэффициент диффузии пара в воздухе.

Суммарный тепловой поток через поверхность раздела фаз принимался равным:

$$q_{sum} = q_{ev} + q_{con},$$

где q_{ev} – тепловой поток вследствие испарения; q_{con} – тепловой поток в результате конвекции.

Тепловой поток вследствие испарения для одной молекулы газа (предложено Ландау [5]) равен:

$$q_{ev} = \kappa (c_s'' - c_{sf}'') \left(\frac{m''}{2\pi K T_{sf}} \right)^{0,5},$$

где κ – скрытая теплота парообразования; c_s'' – концентрация пара насыщения; c_{sf}'' – концентрация пара на границе областей; m'' – масса молекулы пара; K – постоянная Больцмана; T_{sf} – температура насыщения.

Суммарный тепловой поток в приближении метода приведенной пленки вблизи поверхности БВ определялся как [6]:

$$q_{sum} = \frac{Nu}{L} \left[\lambda_{mix} (T_{sf} - T_{\infty}) + D'' \rho_{mix} \kappa \cdot \ln \left(\frac{(m_{mix} (1 - c''))_{\infty}}{(m_{mix} (1 - c''))_{sf}} \right) \right],$$

где Nu – число Нуссельта; L – характерный линейный масштаб процессов у поверхности; λ_{mix} – коэффициент теплопроводности паровоздушной смеси; T_{sf} – температура насыщения (у поверхности); T_{∞} – температура на удалении от поверхности; D'' – коэффициент диффузии пара в воздухе; ρ_{mix} – плотность паровоздушной смеси; κ – скрытая теплота парообразования; m_{mix} – масса паровоздушной смеси; c'' – концентрация пара.

Для численной реализации модельного аналога БВ использовался метод конечных элементов в интерпретации системы COMSOL Multiphysics. При этом решалась задача на установление нестационарного процесса.

Результаты вычислительного эксперимента. В рамках вычислительного эксперимента рассмотрен случай отказа системы расхолаживания БВ. При этом теплосъем с ОТВС обеспечивался только естественной конвекцией и испарением воды с поверхности бассейна, тепловой поток через дно и стенки БВ не учитывался вследствие его малого вклада в общий теплосъем.

В расчете использовались следующие начальные условия: температура воды в БВ – 30°C, температура и влажность входного потока воздуха соответственно – 20°C и 10%, температура ОТВС – 80°C, мощность тепловыделения одной ОТВС – 1 кВт.

Данные параметры, а также характеристики помещения БВ соответствуют реальным конструкторским решениям, что позволяет говорить о практической значимости полученных результатов с целью обоснования безопасности хранения ОЯТ.

Численное моделирование тепломассообменных процессов при хранении ОЯТ в бассейне выдержки было реализовано для трех случаев:

- достаточно высокий уровень воды в БВ;
- пониженный уровень воды в БВ;
- частичное оголение ОТВС.

Проведенные вычислительные эксперименты позволили качественно и количественно оценить тепломассообменные процессы в системе хранения ОТВС.

При численной реализации описанной выше пространственной модели процессов переноса в приреакторном БВ получена сложная картина газодинамических течений, определяющих тепловые потоки с учетом эффекта испарения. Градиентный вид полей температур и концентраций пара в БВ для приведенных выше начальных и граничных условий показан на рис. 3, 4.

Профили распределения температуры по высоте БВ для трех случаев его заполнения водой представлены на рис. 5.

Анализ расчетных полей температур показал, что с понижением уровня заполнения БВ происходит незначительное (на несколько градусов) повышение температуры парогазовой смеси над водной поверхностью. При этом отмечается смешение входного воздушного потока с паровым потоком вследствие нагрева и испарения слоя воды. Интенсивность теплового потока в результате испарения определяется полем концентраций паровой фазы и наиболее интенсивна в области соприкосновения входного конвективного потока с поверхностью воды.

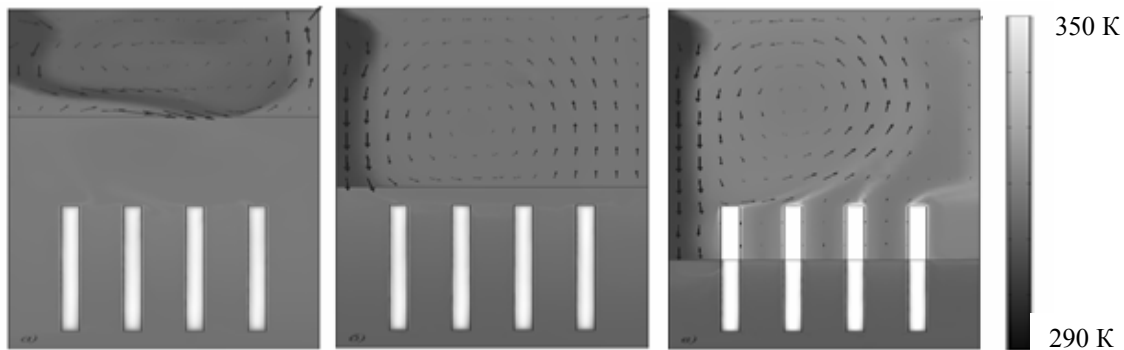


Рис. 3. Пространственное распределение температуры в БВ при различных уровнях его заполнения. Представлены поля температур в диапазоне значений от 290 до 350 К

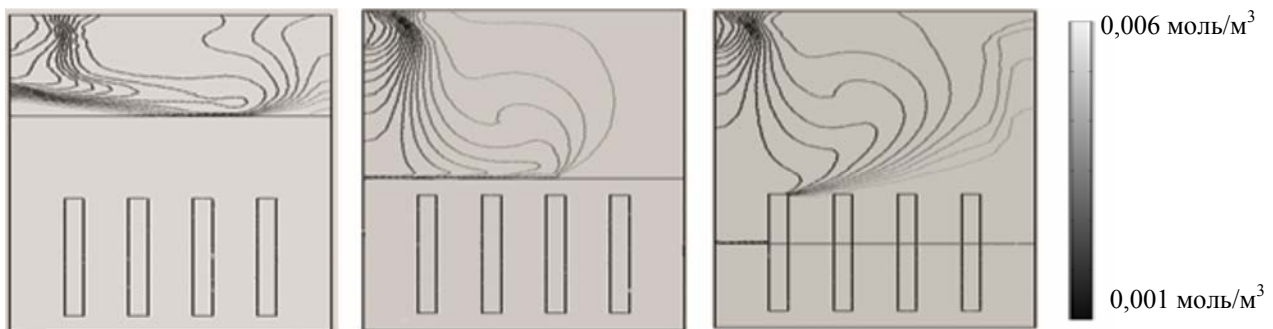


Рис. 4. Пространственное распределение концентрации пара в БВ при различных уровнях его заполнения. Показаны изолинии молярной концентрации пара в паровоздушной смеси в диапазоне значений от 0,001 до 0,006 моль/м³

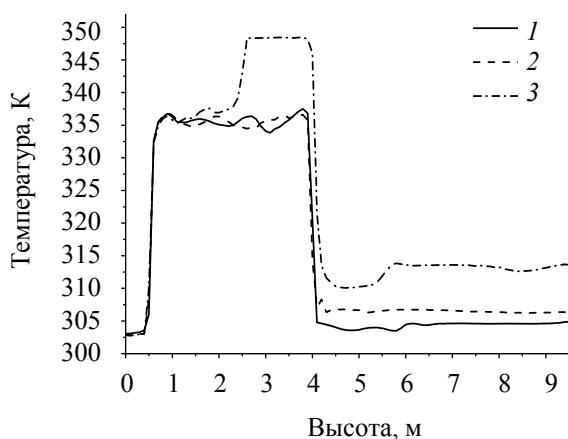


Рис. 5. Профили распределения температуры по высоте БВ для трех случаев заполнения:

- 1 – достаточно высокий уровень воды в БВ;
- 2 – пониженный уровень воды в БВ;
- 3 – частичное оголение ОТВС

Профили концентраций паровой фазы в БВ на высоте 20 см над уровнем воды для трех случаев заполнения БВ представлены на рис. 6.

Наличие минимума концентраций в начале графиков (на входе в БВ), приведенных на рис. 6, связано с нисходящей циркуляцией холодного воздуха из входного вентиляционного отверстия.

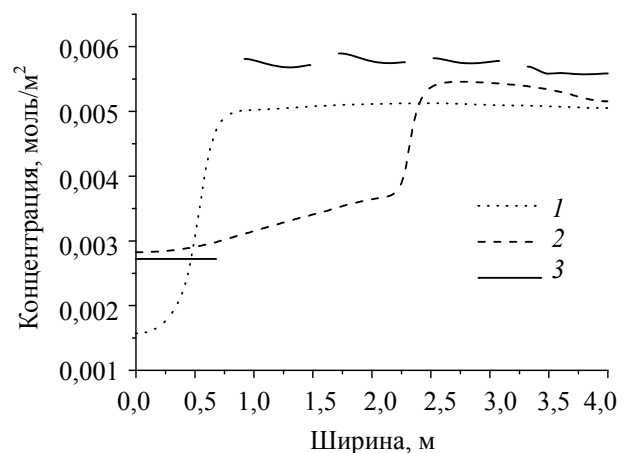


Рис. 6. Профили концентраций паровой фазы в БВ на высоте 20 см над уровнем воды для трех случаев его заполнения:

- 1 – достаточно высокий уровень воды в БВ;
- 2 – пониженный уровень воды в БВ;
- 3 – частичное оголение ОТВС

В случае повышенного уровня заполнения БВ дальнейший рост и выход на устойчивое значение концентрации паровой фазы связан с образованием вихря, который распространяется на всю область над поверхностью воды в БВ. В случае пониженного уровня заполнения БВ образующийся вихрь смещается вправо, что приводит к соответствующему смещению мак-

симула концентрации паровой фазы. Разрывный характер кривой на рис. 7, относящейся к случаю частичного оголения ОТВС, связан с описанием концентрации паровой фазы в промежутках между оголенными ОТВС.

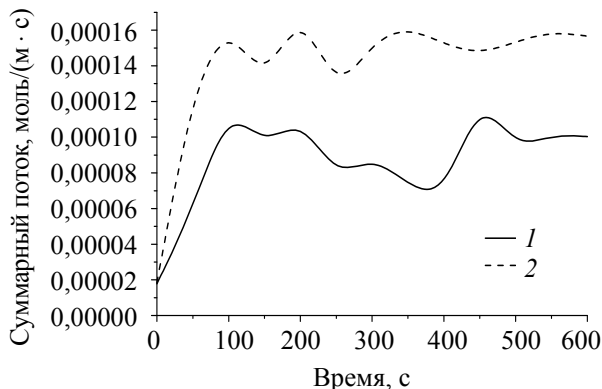


Рис. 7. Нормальный к поверхности БВ суммарный массовый поток паровоздушной смеси:
1 – достаточно высокий уровень воды в БВ;
2 – пониженный уровень воды в БВ

Из трех представленных на рис. 7 случаев заполнения БВ максимальная концентрация паровой фазы наблюдается при оголении ОТВС, что свидетельствует о минимальном в данном случае вкладе испарения в суммарный теплосъем.

Интенсивность теплового потока вследствие испарения определяется полем концентраций паровой фазы и, как следует из рис. 7, имеет наибольшее значение в области соприкосновения входного конвективного потока с поверхностью воды.

На рис. 7 представлена «задача на установление», т. е. выхода на квазистационарный режим значения суммарного массового потока паровоздушной смеси, нормального к поверхности жидкости, который характеризует суммарный, вследствие конвективного переноса и эффекта испарения, тепловой поток.

Как видно из характера кривых на рис. 7, максимальный массовый поток и, соответственно, теплоотвод в БВ ($\sim 5 \text{ Вт/м}^2$) достигается в случае пониженного уровня воды, что связано с интенсификацией конвективного массопереноса.

Заключение. В рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics разработан пространственный модельный аналог процессов тепло-массопереноса в бассейне выдержки ОТВС с учетом конвективного теплопереноса и эффекта испарения. Вклад теплового потока вследствие поверхностного испарения может составлять заметную

(до 20–30%) величину в суммарном теплосъеме с поверхности бассейна выдержки, и его, безусловно, необходимо учитывать при анализе аварийных ситуаций. Показано, что связанная с испарением величина составляющей суммарного теплового потока определяется градиентом концентрации пара в паровоздушной смеси вблизи поверхности испарения, которая в свою очередь зависит от интенсивности конвективных потоков.

Рассмотрены возможные аварийные ситуации, обусловленные понижением уровня воды в бассейне выдержки ОТВС и их возможным оголением вследствие частичного или полного выхода из строя циркуляционного контура штатной системы охлаждения.

Показано, что максимальная температура в бассейне выдержки ОТВС практически не зависит от уровня покрывающего слоя воды, но заметно возрастает при частичном оголении ОТВС. При этом резкое возрастание максимальной температуры отмечается только в случае полного оголения ОТВС.

Разработанный вычислительный шаблон и результаты данного исследования могут быть использованы для проведения анализа безопасности хранения ОЯТ в приреакторных бассейнах выдержки и, в частности, белорусской АЭС.

Литература

1. Технологический процесс перевода ОЯТ РБМК-1000 с «мокрого» на «сухое» хранение / В. И. Калинин [и др.]. – СПб.: ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ», 2010. – С. 107.
2. Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов / В. И. Калинин [и др.]. – СПб.: ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ», 2009. – С. 107.
3. Federovich, E. D. Technical issues of wet and dry storage facilities for spent nuclear fuel / E. D. Federovich, I. I. Poluzunov // Safety related issues of spent nuclear fuel storage. – Springer, 2007. – P. 189–208.
4. Incropera, F. P. Fundamentals of heat and mass transfer / F. P. Incropera, D. P. DeWitt. – New York: John Wiley & Sons, 1996. – P. 350.
5. Ландау, Е. М. Статистическая физика. Ч. 1 / Е. М. Ландау, Л. Д. Лифшиц. – М.: Наука, 1964. – 568 с.
6. Андрижиевский, А. А. Моделирование термомоноконвективных течений в динамических газожидкостных слоях водных охладителей / А. А. Андрижиевский, А. А. Михалевич, А. Г. Трифонов // Доклады Академии наук Беларуси. – 1995. – Т. 39, № 3. – С. 109–113.

Поступила 02.03.2012