

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ ^{238}U ПРОТОНАМИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

А.Ю. Дорошенко, В.В. Кетлеров

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Проведен обзор экспериментов по измерению сечения деления ^{238}U протонами с энергией от 200 до 1000 МэВ. Проанализированы методы измерения сечения деления. На основе литературных данных и с использованием более поздних экспериментальных данных оценены эффективности регистрации осколков деления твердотельными детекторами. В результате анализа эффективностей регистрации, использованных в экспериментах, сделаны поправки на величины сечений деления ^{238}U протонами с энергией 200–1000 МэВ.

ВВЕДЕНИЕ

С начала изучения реакции деления ^{238}U протонами промежуточных энергий, несмотря на многочисленные попытки аналитически описать этот процесс, продолжают исследования и проводятся эксперименты по определению сечения. Первые экспериментальные работы были проведены в 1950 г. [1]. Однако в настоящее время требуется проведение более детальных измерений. С одной стороны, возникшие потребности обусловлены возросшим интересом к ADS-системам, а именно, проблемами обоснования и конструирования мишенных устройств и подкритических энерговыделяющих бланкетов. С другой стороны, из-за существенных расхождений в экспериментальных данных, невозможно корректно установить параметры моделей, описывающих взаимодействие нуклонов промежуточных энергий с ядрами.

Существующая в настоящее время база данных по сечениям деления ядер отсутствует для большинства ядер. Ядро ^{238}U является эталонным для данной области исследований, сечение деления которого используется для относительных измерений [2–4], а при исследовании сложных ядерных реакций на сечение деления нормируются измеряемые сечения других процессов [5].

В данной статье проводится сравнение имеющихся экспериментальных сечений реакции деления ^{238}U протонами с энергией 200–1000 МэВ и выявление причин расхождения результатов. При анализе экспериментальных результатов использовалась программа, созданная для определения эффективности регистрации осколков деления [6].

ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Попытки измерить абсолютное сечение деления ^{238}U протонами промежуточных энергий осуществлялись различными группами авторов на протяжении более пятидесяти лет (см. табл. 1).

Таблица 1

Обзор экспериментов

№	E_p , МэВ	Сечение деления, мбарн	Метод измерения			Источ-ник
			$N_{\text{ядер}}$	$N_{\text{протонов}}$	$N_{\text{осколков}}$	
1	200	1640 1340±50 1470 (1.47 барн) 1570±94	α -спектр. α -спектр. α -спектр. α -спектр.	$^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ ионизац. кам. $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ $^{12}\text{C}(p,n+p)^{11}\text{C}$	радиохимия ионизац. кам. радиохимия стекло	[7] [8] [11] [25]
2	250	1580 (1.58 барн)	α -спектр.	$^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$	радиохимия	[11]
3	300	1680 1375±25 1460 (1.46 барн)	α -спектр. α -спектр. α -спектр.	$^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ ионизац. кам. $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$	радиохимия ионизац. кам. радиохимия	[7] [8] [11]
4	340	1700 (1.7 барн) 1590 (1.59 барн)	α -спектр. α -спектр.	$^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$	радиохимия радиохимия	[7] [11]
5	340-350	2000 (2.0 барн)	α -спектр.	$^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$	радиохимия	[12]
6	350	1400±300	α -спектр.	фотоэмульсии	фотоэмульсии	[9]
7	390	1340±80	относит. станд.	$^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$	стекло	[3]
8	460	1200±300	α -спектр.	фотоэмульсии	фотоэмульсии	[9]
9	480	1270±80	относит. станд.	$^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$	стекло	[3]
10	590	1200±100 1060±140	относит. станд. α -спектр.	ионизац. кам. $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$	стекло слюда	[2] [17]
11	600	1405±160 1204±133 1700±250 1120±170 2270±370	хим. анализ взвеш.+ оптич. метод хим. анализ взвешивание масс-сп. анализ	$^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$	слюда стекло слюда ППД хим., γ , масс-сп.	[15] [16] [18] [21] [24]
12	660	1110±300 1040±75	α -спектр. относит. станд.	фотоэмульсии $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$	фотоэмульсии стекло	[9] [3]
13	1000	620±70 1385±95 1530±230 1140±65 1474±72 1480±60 1530±130	относит. станд. хим. анализ хим. анализ α -спектр. α -спектр. α -спектр. обратная кинематика	$^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ сцинтилляторы цилиндр Фарадея сцинтилляторы и $^{27}\text{Al}(p,3pn)^{24}\text{Na}$ обратная кинематика	стекло слюда слюда ППД стекло ППД обратная кинематика	[4] [15] [18] [5] [20] [23] [27]

До последнего времени, значения энергии протонов в проведенных экспериментах имели значения 200, 250, 300, 340–350, 390, 460, 480, 590, 600, 660 и 1000 МэВ. Таким образом, можно заключить, что с особой тщательностью были проведены измерения в области от 200 до 660 МэВ и при энергии протонов 1000 МэВ. При этом значения сечений деления, измеренные разными группами авторов, имеют расхождения, выходящие за границы приведенных ошибок (рис. 1а).

Согласно определению, абсолютное сечение деления равно

$$\sigma = \frac{N_{\text{fission}}}{N_{\text{nuclei}} \cdot N_{\text{projectile}}},$$

где $N_{\text{projectile}}$ – число частиц, бомбардирующих делящееся вещество в единицу времени; N_{nuclei} – число ядер делящегося вещества, приходящихся на единицу площади, перпендикулярной направлению потока бомбардирующих частиц; N_{fission} – число делений в единицу времени.

Таким образом, измерение абсолютного сечения деления состоит из следующих основных этапов:

- измерение числа ядер в мишени;
- измерение числа протонов, прошедших сквозь мишень;
- измерение числа делительных событий.

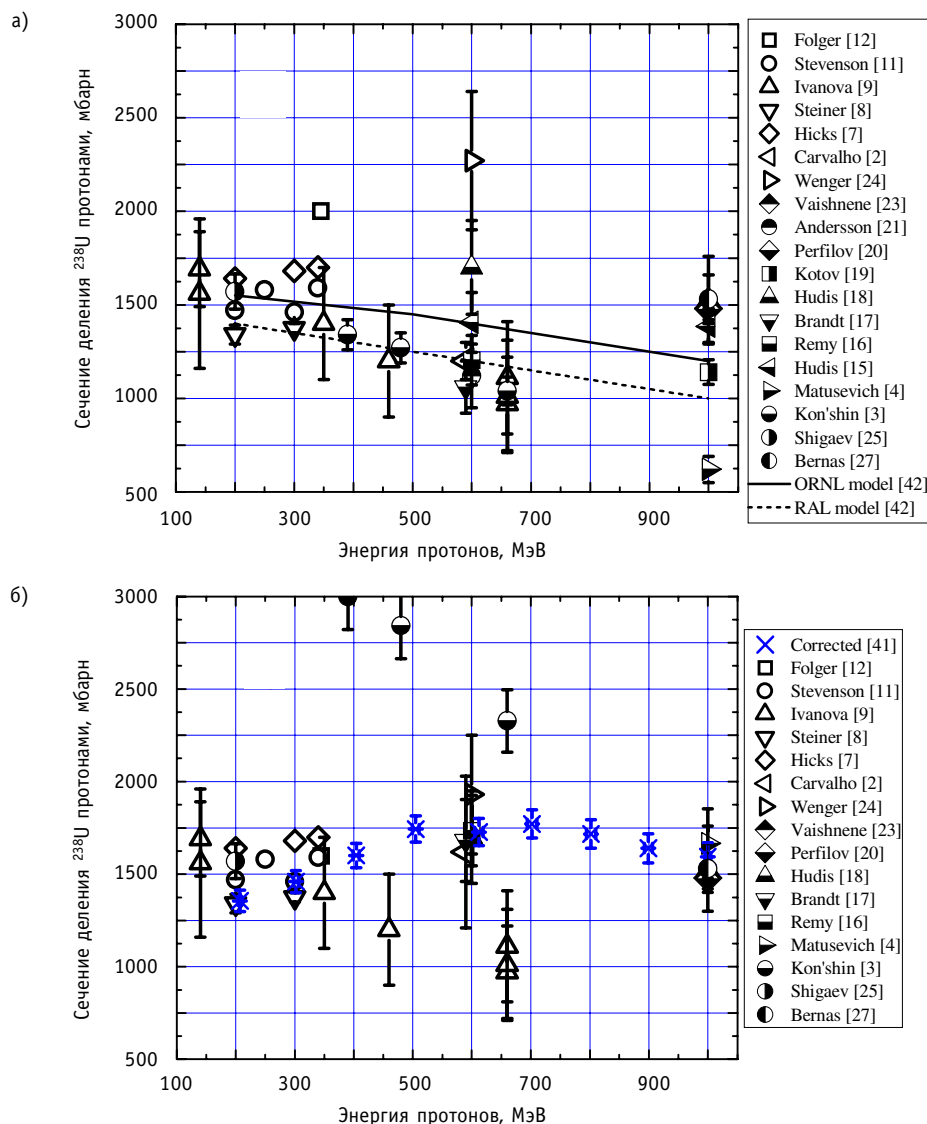


Рис. 1. Экспериментальные сечения деления ^{238}U протонами промежуточных энергий: а) – без учета поправок на эффективность регистрации осколков деления; б) – с учетом поправок

С учетом такого разделения в табл. 1 приведены методы измерения сечения деления, используемые в различных экспериментах.

Методы, относящиеся к группе измерения числа ядер в мишени, за редким исключением, основаны на регистрации α -частиц ^{238}U [5, 7–9, 11, 12, 17, 20, 23]. В других случаях использовался метод взвешивания [16, 21], химический анализ [15, 18], масс-спектрометрический метод [18]. В работе, описанной в ссылке [16], наряду с взвешиванием, использовался также оптический метод. А в ряде случаев [2–4] для определения числа ядер в мишени привязывались к предполагаемому значению сечения деления при энергии протонов 280 МэВ, проводя таким образом относительные измерения сечений деления.

В экспериментах, приведенных в табл. 1, преимущественно использовались тонкие мишени, а число ядер определялось, как правило, с помощью альфа-спектрометрии. Данное обстоятельство не может привести к значительным расхождениям при

измерении абсолютного сечения деления разными группами авторов. Тем не менее, предполагается качественное изготовление мишеней, выбор соответствующих подложек, измерение α -активностей мишеней с учетом геометрической эффективности, учет неравномерности толщины мишеней и возможного фона, что должно являться неотъемлемой особенностью любого эксперимента.

Число протонов, прошедших сквозь мишень, измерялось с помощью активационных методов, в основном, использовались значения реакции $^{27}\text{Al}(p,3p)n)^{24}\text{Na}$ [3, 4, 7, 11, 12, 15–18, 21, 23], а также $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$ [24]. Значительно реже использовались ионизационные камеры [2, 8], сцинтилляционные детекторы [5, 23] и цилиндр Фарадея [20]. Авторы работы [23] применяют смешанные методы регистрации протонов.

Методам регистрации делительных событий отводится особое место при исследовании процесса деления протонами промежуточных энергий. В силу того, что ядра с высокой энергией возбуждения могут иметь выходные каналы реакции, конкурирующие с каналами деления, разные методы регистрации осколков деления могут вносить неучтенную систематическую ошибку при измерении полного сечения деления. Ввиду такого обстоятельства, для измерения числа делительных событий применялись самые разнообразные методы регистрации осколков деления. В работах [7, 11, 12] описывается применение радиохимических методов. Полупроводниковые барьерные детекторы (ППД) также использовались в ряде работ [5, 21, 23], несмотря на их слабую устойчивость к флюенсу протонов. Ионизационные камеры и фотоэмульсии использовались однажды ([8] и [9] соответственно). В работе [24] представлены результаты использования комплекса методов, а именно, химического анализа, плазменной масс-спектрометрии и γ -спектроскопии. Отдельно стоит сказать о твердотельных трековых детекторах, используемых для определения числа делительных событий [2–4, 15–18, 20]. В частности, в качестве рабочего вещества детектора применялись как слюда [15, 17, 18], так и стекло [2–4, 16, 20].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ

Для определения эффективности регистрации осколков деления использовалась программа на основе метода Монте-Карло [6]. Алгоритм работы программы показан на рис. 2. При расчете эффективности регистрации осколков деления в программе учитывается распределение осколков деления по массам, заряду и кинетической энергии, а также передача импульса ядру мишени налетающим протоном. Потери кинетической энергии осколками при прохождении материалов мишени и детекторов рассчитывались с помощью программы SRIM и формализма Бете-Линхарда [13, 14].

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Как видно из данных, представленных в табл. 1 и на рис. 1а, существующие измеренные сечения деления имеют значительные расхождения. Однако критический анализ имеющихся результатов с выявлением возможных систематических погрешностей может поправить данную картину.

Использование сечения реакции $^{27}\text{Al}(p,3p)n)^{24}\text{Na}$ большинством авторов для мониторингирования пучка протонов не дает оснований для наблюдаемых расхождений в значении сечения деления. Более того, эксперименты, проводимые в разные годы с использованием данной мониторинговой реакции, имеют хорошо согласующиеся результаты в пределах $\sim 10\%$ [29–38]. В то же время, к примеру, максимальные расхождения в значениях сечений деления, имеющиеся для энергии протонов в районе 600 и 1000 МэВ, были получены авторами работ [3, 4] и [18], которые использовали одни и те же результаты измеренного значения сечения реакции $^{27}\text{Al}(p,3p)n)^{24}\text{Na}$ [29].

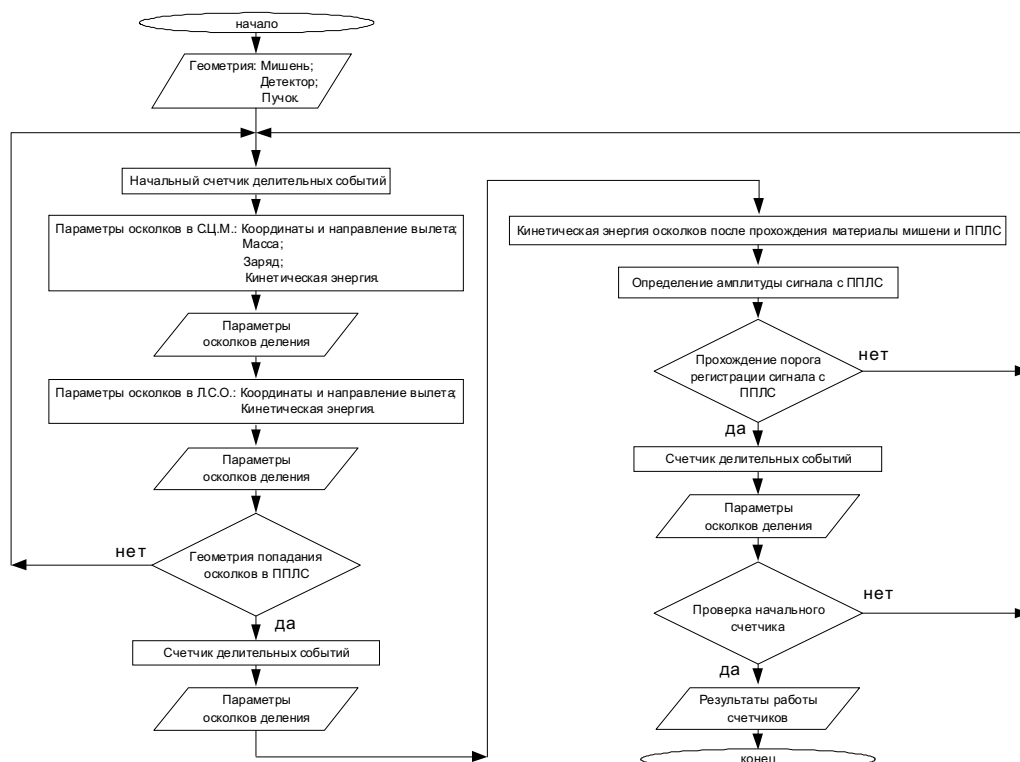


Рис. 2. Алгоритм программы определения эффективности регистрации осколков деления

Метод регистрации α -частиц позволяет определить число ядер мишени с достаточной точностью и большинство авторов не указывают эффективности регистрации измерительной системы. Это не позволяет оценить систематические ошибки измерений.

С другой стороны, процесс взаимодействия ядер с протонами промежуточных энергий, включает в себя целый ряд конкурирующих выходных каналов реакции. Это приводит к сложностям при регистрации осколков деления, связанным с выделением осколков из продуктов реакции. Поэтому наиболее вероятной причиной расхождения экспериментальных данных является регистрация продуктов реакции одновременно с осколками деления.

Ниже рассмотрены возможные систематические ошибки, связанные, в основном, с эффективностью регистрации осколков деления. Для определения эффективности регистрации, где это было возможно, использовался метод Монте-Карло и геометрия систем регистрации осколков деления. Во внимание также принимались полученные из более поздних работ данные о порогах регистрации заряженных частиц в рабочих слоях детекторов [19].

В работе [12] рассмотрен радиохимический метод определения выходов продуктов деления. Отмечается, что значение сечения деления, равное 2 барна, было получено в результате интегрирования кривой массового распределения продуктов распада [12]. При этом измеренные выходы предполагаемых продуктов деления дают суммарное сечение образования порядка 0,5 барн, что составляет 25% полного сечения деления [12]. Однако, если для остальных продуктов деления принять интерполированные значения выходов, сечение деления составит величину 1,6 барн.

Другая неучтенная систематическая погрешность измерения сечения деления при определении парциальных сечений выходов продуктов деления связана, возможно,

с погрешностями в измерениях выходов большинства продуктов деления. Так, в работе [17] отмечается, что радиохимические методы дают верхнюю либо нижнюю границу сечения деления. В работах [7, 11], выпущенных в разные годы одними и теми же авторами, отмечается тенденция уменьшения сечения деления после пересмотра результатов эксперимента.

В [25] авторы использовали твердотельные детекторы из силикатного стекла. Эффективность регистрации такого детектора определяется критическим углом входа осколка деления не больше 17° к нормали поверхности [28], массой осколка не менее 30 а.е.м. и кинетической энергией не ниже 6 МэВ [20]. Одновременно с сечением деления определялась анизотропия разлета осколков деления. Размеры системы позволяли рассматривать мишень в качестве точечного источника, в результате чего систематическая ошибка, связанная с определением эффективности регистрации осколков деления, оказывается незначительной. Измерения [25] показали, что деление ^{238}U протонами 200 МэВ изотропно в системе центра масс. При этом сечение деления составило (1570 ± 94) мбарн. Подобная методика была использована при облучении мишени протонами с энергией 1000 МэВ [20]. Сечение деления ^{238}U составило (1474 ± 72) мбарн при изотропном разлете осколков деления в системе центра масс. Авторы отмечают, что преимущество использованной ими геометрии над геометрией «сэндвич», примененной в других работах [13–18], заключается в попадании осколков деления почти перпендикулярно к поверхности детектора. Такие осколки создают однородные по форме и размерам треки, которые легче идентифицировать.

Авторы [24], измеряющие выходы продуктов деления, получили значение полного сечения деления (2270 ± 370) мбарн – в среднем вдвое превышающее значения сечения, полученные другими методами при энергии протонов 600 МэВ. Для определения выходов продуктов деления использовались методы масс-спектрометрии и γ -спектроскопии. Отсканированный с помощью γ -спектрометра профиль пучка имеет необычную кольцевую форму. При этом внешний диаметр кольца равен 4 мм, в то время как мишень представляла собой микросферу диаметром порядка 3 мм. Авторы отмечают возможную систематическую ошибку ($<15\%$), связанную с данным эффектом. Учет этой ошибки дает поправленное сечение деления (1930 ± 320) мбарн (рис. 16). Завышенное сечение деления также может быть объяснено возможным присутствием в пучке фоновых частиц.

Использование твердотельных детекторов из поликарбоната (makrofol) для регистрации осколков деления в работе [16], дало значение сечения деления (1204 ± 133) мбарн при энергии налетающих протонов 600 МэВ. Авторы указывают на эффективность регистрации осколков деления 98%, достигнутую благодаря нанесению делящегося вещества на поверхность детектора путем испарения в вакууме (делящийся слой находился между двумя пластинами детектора). Непарные треки не принимались авторами за делительные события. В более поздних исследованиях [19] было выявлено, что эффективность регистрации осколков деления поликарбонатами зависит от угла падающего осколка к нормали поверхности детектора. Данное обстоятельство послужило основанием пересчитать эффективность регистрации, приведенную в работе [16], которая составила 68%. В результате внесенной поправки, сечение деления приняло значение (1735 ± 190) мбарн (рис. 16).

При исследовании деления ^{238}U протонами с энергией 600 МэВ и 1000 МэВ с помощью слюдяных детекторов, обладающих эффективностью регистрации осколков деления $\sim 100\%$, авторы [15] получили сечения деления, равные (1405 ± 160) мбарн и (1385 ± 95) мбарн соответственно. Однако, проведя дополнительные исследования характеристик регистрации осколков деления, авторы отмечают увеличение сечения

деления ((1700 ± 250) мбарн и (1530 ± 230) мбарн соответственно), из-за более низкого порога регистрации детектора [18]. Так, при повторном сканировании слюдяных поверхностей через микроскоп, в отличие от использования высокочувствительных фотографий, были обнаружены дополнительные парные треки от осколков деления. Отмечается также отличие этих треков от треков, регистрируемых в результате деления урана тепловыми нейтронами. Независимо от этого за делительные события принимались парные треки, проекции которых составляли не менее 4 мкм, а эффективность регистрации принималась равной $95 \div 99\%$ [18].

Слюдяные детекторы использовались и в работе [17]. Авторами было получено сечение деления (1060 ± 140) мбарн при энергии налетающих протонов 590 МэВ. Делящийся слой наносился на подложку из алюминия толщиной 200 мкг/см². Мишень помещалась между пластинами слюды. Детальное изучение эффективности регистрации слюдяных детекторов, используемых в работе [17], приведено в работе [22]. При делении урана тепловыми нейтронами (изотропное угловое распределение осколков деления) отмечается, что максимальное расстояние между точками входа осколков деления в детектор, обусловленное возможностью объектива используемого микроскопа, составляло 60 мкм, а расстояние между пластинами слюды было не более 8 мкм [22]. Данная геометрия позволяет регистрировать осколки деления, входящие под углом не более 82° к нормали к поверхности детектора. Такая геометрия была смоделирована с помощью программы определения эффективности регистрации осколков деления [6] (см. рис. 2). Полученная эффективность регистрации составила 75%.

В [17] поправки, связанные с эффективностью регистрации осколков деления принимались в пределах $5 \div 25\%$. В отличие от [22], за делительные события принимались парные треки, если расстояние между точками входа осколков в детектор составляло не более 20 мкм, а пробеги осколков превышали 3 мкм. В этом случае максимальный угол регистрации составляет 75° , а рассчитанная эффективность регистрации осколков деления не превышает 63%. Учитывая такое отличие в эффективности регистрации осколков деления, вносимый на величину сечения деления ^{238}U протонами с энергией 590 МэВ поправочный коэффициент увеличивает полученное в работе [17] сечение до (1682 ± 222) мбарн.

В работе [2] измерение сечения деления ряда ядер (^{232}Th , ^{209}Bi , ^{184}W и Ag) проводилось относительно сечения деления ^{238}U при энергии протонов (591 ± 3) МэВ. Значение сечения деления для ^{238}U было принято равным $(1,2 \pm 0,1)$ барн, а отношения сечений деления других ядер к сечению деления ^{238}U были получены с точностью в 1% [2]. Однако отношение полного сечения деления, полученного для ^{209}Bi в [18] к сечению деления из [2], равно $1,35 \pm 0,32$. Сечение деления для ^{232}Th было получено в [17] и составило (850 ± 150) мбарн, что в $1,16 \pm 0,24$ раз больше, чем сечение из [2], в то время как в [17] имеется неучтенная поправка на эффективность регистрации осколков деления (см. выше). Сечения деления для ядер ^{184}W и Ag на порядки ниже сечений рассмотренных ядер и имеют большие погрешности. Тем не менее сечения деления, полученные для этих ядер в работе [2], лежат ниже относительно данных, опубликованных другими авторами [17, 18]. Таким образом, для сечения деления ^{238}U из работы [2] разумно выбрать поправочный коэффициент, равный $1,35 \pm 0,32$, что даст значение сечения деления ^{238}U , равное $(1,62 \pm 0,41)$ барн.

В [21] сечение деления ^{238}U протонами с энергией 600 МэВ равно $(1,12 \pm 0,17)$ барн. Пара осколков деления регистрировалась двумя полупроводниковыми кремниевыми детекторами. Угол регистрации одного из осколков не изменялся и составлял 90° по отношению к направлению падающего пучка протонов. Выбор угла вылета второго осколка определялся с помощью расчета, описанного в [39]. Анализ

работы [21] позволяет заключить, что эффективность регистрации осколков деления составляет 8%. Данные, полученные авторами касательно угловых характеристик осколков деления, и оценки средних величин, характеризующих процесс деления (средняя энергия возбуждения, температура, массовое число и заряд делящегося ядра) представляют большой интерес. Однако систематическую ошибку измерения сечения деления при такой малой эффективности регистрации трудно оценить, и на рис. 16 обсуждаемая точка не приводится.

Результаты работ [3, 4] показывают энергетическую зависимость сечения деления ^{238}U протонами с энергией 390, 480, 660 и 1000 МэВ. Сечение деления для этих энергий равны соответственно (1340 ± 80) мбарн, (1270 ± 80) мбарн, (1040 ± 75) мбарн и (620 ± 70) мбарн. Авторами отмечается монотонное уменьшение сечения деления при увеличении энергии протонов (см. рис. 1а). Такое поведение сечения деления отличается от результатов, полученных в остальных экспериментах, хотя не противоречит существующим на данный момент представлениям о механизме деления. В обеих работах в качестве детектора осколков деления авторы использовали фотостекло. Мишень из ^{238}U , нанесенная на подложку из алюминия, помещалась между стеклами. Эффективность регистрации осколков деления в [3] принималась равной ~30% при углах погружения осколков деления в детектор $25\text{--}30^\circ$ к нормали. В [4] эффективность регистрации осколков деления определялась с помощью ^{240}Pu –стандарта и составляла $(36 \pm 1,5)\%$. Авторами предполагалось, что передача параллельного импульса протоном делящемуся ядру незначительна, т.к. каскадное выбивание нуклонов из ядра происходит преимущественно в направлении налетающего протона. Число делительных событий (M) принималось равным среднему значению между числом осколков, зарегистрированных в направлении пучка (N_B) протонов и числом осколков (N_H), зарегистрированных в противоположной полусфере [3].

Для определения эффективности регистрации осколков деления для детекторов, использованных в работах [3, 4], были проведены расчеты с помощью метода Монте-Карло. При критическом угле регистрации осколка, равном 30° к нормали к поверхности детектора, эффективность регистрации составляет 13,4%, а не 30 и 36%, как показывают авторы. В результате сделанных поправок, сечения деления для энергий 390, 480, 660 и 1000 МэВ составили (3000 ± 180) мбарн, (2843 ± 180) мбарн, (2328 ± 168) мбарн и (1665 ± 188) мбарн соответственно (рис. 1б). Таким образом, сделанные поправки не повлияли на энергетическую зависимость сечения деления. Однако сечение деления ^{238}U протонами с энергией 1000 МэВ совпало в пределах погрешности с величиной, полученной другими авторами.

В отличие от других экспериментов, измерения, описанные в работе [3], проводились на внутреннем пучке фазотрона ОИЯИ в г. Дубне. Пучок предназначен для радиохимических исследований в диапазоне энергий от 70 до 660 МэВ. Положение мишени в вакуумной камере фазотрона определялось энергией протонов в витке на определенном расстоянии от центра спирали ускорения протонов. Результаты измерений приводятся относительно сечения деления ^{238}U протонами с энергией 280 МэВ. При этом не проводилось оценок зависимости фона частиц от положения мишени. Если вероятность деления фоновыми частицами соизмерима с вероятностью деления протонами пучка и уменьшается с увеличением расстояния от центра ускорения, то измеренное сечение деления будет убывать с увеличением энергии, что и показали авторы работы [3]. Таким образом, оценка фона внутри вакуумной камеры ускорителя может в значительной степени повлиять на энергетическую зависимость сечения деления, полученного в работе [3].

Изучение деления природного урана протонами с энергией 140, 350, 460 и 660 МэВ проводилось в работе [9]. Перечисленные энергии получались на синхротро-
 циклотро-

не торможением протонов с энергией 660 МэВ в медных и парафиновых фильтрах. В работе ничего не говорится о возможном фоне нейтронов. Осколки деления регистрировались при помощи метода толстослойных фотоэмульсий. Для измерения сечений деления при разных энергиях протонов использовались эмульсии разной чувствительности. Поток на малочувствительных эмульсиях определялся путем подсчета первичных протонов на фотопластинке релятивистской чувствительности, поставленной после облучения малочувствительной эмульсии на то же самое место, при экспозиции в определенное число раз меньшее, чем для эмульсии малочувствительной. Контроль экспозиции облучения той и другой эмульсии проводился при помощи ионизационной камеры, поставленной непосредственно перед фотопластинками и регистрирующей по числу импульсов общий поток протонов, падающий на всю площадь камеры. Оценка просчетов ионизационной камеры при переходе к высокой интенсивности, к сожалению, не указывается. Уран вводился в фотослой путем купания в водном растворе соли $\text{NaUO}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_3$. Число ядер в мишени определялось, исходя из числа альфа-частиц, зарегистрированных в том же объеме фотоэмульсии, в котором подсчитывалось число осколков деления. Из-за малой статистики делительных событий (< 57) и возможных систематических ошибок, связанных с просчетом протонов в ионизационной камере и фона нейтронов в пучке при использовании медных и парафиновых фильтров, трудно судить об энергетической зависимости сечения деления.

Сечение деления ^{238}U протонами с энергией 1000 МэВ было измерено авторами работы [40] ((1385 ± 140) мбарн). Позднее была опубликована статья [5], в которой авторы вносят поправки в ранее опубликованные результаты и отмечают более низкое сечение, равное (1140 ± 65) мбарн. В следующей работе авторов [23] сечение деления было перемерено и оказалось равным (1480 ± 60) мбарн. В обоих измерениях использовались полупроводниковые кремниевые детекторы для регистрации осколков деления, что дает основание считать более весомыми результаты работы [23].

Работы [26, 27] по исследованию взаимодействия ядер ^{238}U , энергия которых составляла 1 ГэВ на нуклон, с протонами, выступающими в роли мишени, были проведены недавно. Сечение деления, полученное авторами в так называемой обратной кинематике, составило $(1,53 \pm 13)$ барн. Число делений определялось путем выделения осколков деления из продуктов реакций.

Измерения энергетической зависимости сечения деления ^{238}U протонами с энергией от 200 до 1000 МэВ с шагом 100 МэВ были проведены на синхротроне в ПИЯФ РАН г. Гатчине в 2003 г. [41]. В качестве детекторов осколков деления использовались плоско-параллельные лавинные счетчики с телесным углом регистрации 10 срад., регистрирующие пару осколков деления и работающие в схеме совпадений. Число протонов измерялось с помощью сцинтилляторов с эффективностью регистрации от 92 до 98%. Мишень представляла собой тонкий слой UF_4 толщиной порядка 150 мкг/см^2 , нанесенный на подложку толщиной порядка 160 мкг/см^2 . Предварительные результаты исследований представлены в работе [41]. На рис. 16 («Corrected [41]») приводятся результаты этих измерений с учетом поправок на эффективность регистрации осколков деления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ экспериментального сечения деления ^{238}U протонами с энергией от 200 до 1000 МэВ.

В результате критического рассмотрения экспериментальных данных с внесением систематических поправок получен рис. 16. При внесении поправок были иссле-

дованы эффективности регистрации осколков деления, приводимые авторами работ с расчетными значениями по программе, представленной в [6].

Рассмотрение результатов, полученных в разных экспериментах, позволяет судить о более устойчивом сечении, полученном при регистрации осколков деления ионизационными методами, в отличие от использования твердотельных детекторов.

В результате анализа литературы было уточнено сечение деления ^{238}U протонами с энергией 1000 МэВ, которое составило порядка 1,6 барна.

Несмотря на поправки в эффективности регистрации осколков деления, остаются неясности в отличии энергетической зависимости сечения, полученного в работах [3, 9] от других работ в диапазоне энергий протонов от 200 до 660 МэВ.

В [41] сечение деления получено во всем рассматриваемом энергетическом диапазоне. Как видно из рис. 16, сечение деления ^{238}U монотонно увеличивается от 1,4 до 1,8 барна в интервале энергий протонов от 200 до 700 МэВ и монотонно уменьшается до сечения деления 1,6 барн при дальнейшем увеличении энергии протонов до 1000 МэВ.

Литература

1. *Jungerman J.* Fission Excitation Functions for Charged Particles // *Phys. Rev.* – 1950. – V. 79. – P. 632-640.
2. *Carvalho H.G. de, Potenza G., Rinzivillo R., et al.* Experimental Results on the Nuclear Fission Produced by 600 MeV Protons // *Nuovo Cimento.* – 1963. – V. XXV. – № 4. – P. 880-889.
3. *Коньшин В.А., Матусевич Е.С., Резушевский В.И.* Сечения деления ^{181}Ta , Re , Pt , ^{197}Au , Pb , ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{235}U и ^{238}U протонами с энергией 150 – 660 МэВ // *Ядерная физика.* – 1965. – Т. 2. – Вып. 4. – С. 682-686.
4. *Матусевич Е.С., Резушевский В.И.* Сечения деления ^{209}Bi , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu протонами с энергией 1 – 9 ГэВ // *Ядерная физика.* – 1968. – Т. 7. – Вып. 6. – С. 1187-1189.
5. *Андроненко Л.Н., Вайшнине Л.А., Горшков Б.Л. и др.* Измерение полного сечения деления ядер ^{238}U протонами с энергией $E_p = 1$ ГэВ // *Ядерная физика.* – 1976. – Т. 24. – Вып. 3. – С. 671-672.
6. *Дорошенко А.Ю., Кетлеров В.В.* Эффективность регистрации осколков деления ^{238}U протонами промежуточных энергий сборкой из двух плоскопараллельных лавинных счетчиков / Препринт ФЭИ. – Обнинск: ГИЦ РФ-ФЭИ (готовится к публикации).
7. *Hicks H.G., Gilbert R.S.* Radiochemical Studies of the High-Energy Fission Process // *Phys. Rev.* – 1955. – V. – 100. – P. 1286-1293.
8. *Steiner H.M., Jungerman J.A.* Proton-Induced Fission Cross Sections for ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{209}Bi , and ^{197}Au at 100 to 340 MeV // *Phys. Rev.* – 1956. – V. 101. – P. 807-813.
9. *Иванова Н.С.* Сечение деления урана протонами высоких энергий (от 140 до 660 МэВ) // *ЖЭТФ.* – 1956. – Т. 31. – Вып. 3(9). – С. 413-415.
10. *Иванова Н.С., Пьянов И.И.* Деление ядер урана протонами высоких энергий // *ЖЭТФ.* – 1956. – Т. 31. – Вып. 3(9). – С. 416-423.
11. *Stevenson P.S., Hicks H.G., Nervik W.E., Nethaway D.R.* Further Radiochemical Studies of the High-Energy Fission Products // *Phys. Rev.* – 1958. – V. 111. – P. 886-891.
12. *Folger R.L., Stevenson P.C., Seaborg G.T.* High-Energy Proton Spallation-Fission of Uranium // *Phys. Rev.* – 1955. – V. 98. – P. 107-120.
13. *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.* The Stopping and Ranges of Ions in Solids. – New York: Pergamon Press, 1985.
14. *Рыков В.А.* Равновесные и неравновесные потери энергии осколков деления в тонких пленках / Препринт ФЭТ-2612. – Обнинск: ГИЦ РФ-ФЭИ, 1997.
15. *Hudis J., Katcoff S.* High-Energy-Proton Fission Cross Sections of U, Bi, Au, and Ag Measured with Mica Track Detectors // *Phys. Rev.* – 1969. – V. 180. – P. 1122-1130.
16. *Remy G., Ralarosy J., Stein R. et al.* Cross Sections for Binary and Ternary Fission Induced by High-Energy Protons in Uranium and Lead // *Nuclear Physics A.* – 1971. – V. 163. – P. 583-591.

17. *Brandt R., Carbonara F., Cieslak E. et al.* The Study of Nuclear Fission Induced by High-Energy Protons//*Revue de physique appliqué*. – 1972. – V. 7. – P. 243-251.
18. *Hudis J., Katcoff S.* Interaction of 0.6 – 300 GeV protons with U, Bi, Au, and Ag; mica track detector study//*Phys. Rev. C*. – 1975. – V. 13. – №5. – P. 1961-1965.
19. *Chekirine M., Ammi H.* On the Use of Makrofol KG to Study Fission Fragment angular distributions//*Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A*. – 1999. – V. 433. – P. 614-618.
20. *Бочагов Б.А., Быченко В.С., Дмитриев В.Д. и др.* Определение сечений деления ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{209}Bi , $^{208-206}\text{Pb}$, ^{197}Au , ^{181}Ta Yb и Sm протонами с энергией 1 ГэВ//*Ядерная физика*. – 1978. – Т. 28. – Вып. 2. – С. 572-575.
21. *Andersson G., Areskoung M., Gustafsson H.-A. et al.* Medium Energy Proton Induced Fission in Tb, La and Ag//*Z. Physik A*. – 1979. – V. 293. – P. 241-251.
22. *Cieslak E., Piekarczyk J., Zakrzewski J. et al.* Observation of Fission Events in Mica Sandwiches//*Nucl. Instr. and Meth.* – 1966. – V. 39. – P. 224-231.
23. *Vaishnane L.A., Andronenko L.N., Kovshevny G.G. et al.* Fission Cross Sections of Medium-Weight and Heavy Nuclei Induced by 1 GeV Protons//*Zeitschrift fur Physik A – Atoms and Nuclei*. – 1981. – V. 302. – P. 143-148.
24. *Wenger H.U., Botta F., Chawla R. et al.* A High-Fluence 0.6 GeV Proton Irradiation Experiment with Thin Uranium and Thorium Targets//*Annals of Nuclear Energy*. – 1999. – V. 26. – P. 141-148.
25. *Быченко В.С., Ломанов М.Ф., Обухов А.И. и др.* Сечение и величина угловой анизотропии деления ядер при облучении ^{238}U , ^{209}Bi , $^{208-206}\text{Pb}$ и ^{197}Au протонами с энергией в интервале 70 – 200 МэВ//*Ядерная физика*. – 1973. – Т. 17. – Вып. 5. – С. 947-949.
26. *Taieb J., Schmidt K.-H., Tassan-Got L. et al.* Evaporation residues produced in the spallation reaction $^{238}\text{U} + p$ at 1 A GeV//*Nucl. Phys. A*. – 2003. – V. 724. – P. 413-430.
27. *Bernas M., Armbruster P., Benlliure J. et al.* Fission-residues produced in the spallation reaction $^{238}\text{U} + p$ at 1 A GeV//*Nucl. Phys. A*. – 2003. – V. 725. – P. 213-253.
28. *Fleischer R.L., Price P.B., Walker R.M., Hubbard E.L.* Track Registration in Various Solid-State Nuclear Track Detectors//*Phys. Rev.* – 1964. – V. 133. – №5A. – P. 1443-1450.
29. *Cumming J.B.* Monitor Reactions for High Energy Proton Beams//*Ann. Rev. Nucl. Sci.* – 1963. – V. 13. – P. 261-270.
30. *Michel R., Dragovitsch P., Englert P., Peiffer F. et al.* On the depth dependence of spallation reactions in a spherical thick diorite target homogeneously irradiated by 600 MeV protons : Simulation of production of cosmogenic nuclides in small meteorites//*Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*. – 1986. – V. 16. – P. 61-82.
31. *Michel R., Gloris M., Lange H.-J. et al.* Nuclide production by proton-induced reactions on elements ($6 \leq Z \leq 29$) in the energy range from 800 to 2600 MeV//*Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*. – 1995. – V. 103. – P. 183-222.
32. *Yule H.P., Turkevich A.* Radiochemical Studies of the (p, pn) Reaction in Complex Nuclei in the 80-450-MeV Range//*Phys. Rev.* – 1960. – V. 118. – P. 1591-1598.
33. *Schiekel Th., Sudbrock F., Herpers U. et al.* Nuclide production by proton-induced reactions on elements ($6 \leq Z \leq 29$) in the energy range from 200 MeV to 400 MeV//*Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*. – 1996. – V. 114. – P. 91-119.
34. *Friedlander G., Hudis J., Wolfgang R. L.* Disintegration of Aluminum by Protons in the Energy Range 0.4 to 3.0 BeV//*Phys. Rev.* – 1955. – V. 99. – P. 263-268.
35. *Taddeucci T.N., Ullmann J., Rybarczyk L.J. et al.* Total cross sections for production of ^7Be , ^{22}Na , and ^{24}Na in $p+^7\text{Li}$ and $p+^{27}\text{Al}$ reactions at 495 and 795 MeV//*Phys. Rev. C*. – 1997. – V. 55. – P. 155-1554.
36. *Vastupal Parikh* Cross-sections for $\text{Al}^{27}(\text{p}, 3\text{pn})\text{Na}^{24}$, $\text{Al}^{27}(\text{p}, 5\text{p}5\text{n})\text{F}^{18}$ and $\text{C}^{12}(\text{p}, 3\text{p}3\text{n})\text{Be}^7$ relative to $\text{C}^{12}(\text{p}, \text{pn})\text{C}^{11}$ //*Nucl. Phys.* – 1960. – V. 18. – P. 638-645.
37. *Goebel K., Harting D., Kluyver J.C. et al.* The $\text{C}^{12}(\text{p}, \text{pn})\text{C}^{11}$ and $\text{Al}^{27}(\text{p}, 3\text{pn})\text{Na}^{24}$ cross-sections at 591 MeV//*Nucl. Phys.* – 1961. – V. 24. – P. 28-35.
38. *Hiks H.G., Stevenson P.C., Nervik W.E.* Reaction $\text{Al}^{27}(\text{p}, 3\text{pn})\text{Na}^{24}$ //*Phys. Rev.* – 1956. – V. 102. – P. 1390-1392.
39. *Andersson G., Areskoung M., Gustafsson H. et al.* Analysis of Angular Correlations Between Complementary Fission Products//*Nucl. Instr. and Meth.* – 1979. – V. 163. – P. 165-175.

40. Котов А.А., Семенчук Г.Г., Андроненко Л.Н. и др. Угловые корреляции парных осколков при делении ядер протонами с энергией $E_p = 1$ ГэВ // Ядерная физика. – 1974. – Т. 19. – Вып. 4. – С. 756-760.

41. Котов А.А., Гавриков Ю.А., Дорошенко А.Ю. и др. Экспериментальное исследование энергетической зависимости полных сечений деления ядер ^{238}U , ^{235}U , ^{209}Bi , ^{208}Pb протонами в интервале энергии 200-1000 МэВ // Известия РАН. Серия физическая. – 2003. – Т. 67. – № 11. – С. 1628-1631.

42. Armstrong T.W., Cloth P., Filges D., Neef R.D. An Investigation of fission models for high-energy radiation transport calculations: KFA Report JUEL-1859, 1983.

Поступила в редакцию 19.08.2005

УДК 539.173.12

Experimental Cross-Sections of ^{238}U Fission Induced by Intermediate Energy Protons \A.Yu. Doroshenko, V.V. Ketlerov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 12 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 42 titles.

It was made the review of experiments on determining cross-section of ^{238}U fission induced by protons with energies from 200 to 1000 MeV. Experimental methods used in measurements were analyzed. Estimation of fragment fission registration effectiveness was provided on basis of the experiments description and with the help of newer solid track detectors characteristics measurements. As a result of conducted analysis of the effectiveness, we have corrected cross-section of the ^{238}U fission induced by protons in the energy region of interest.

УДК 621.039.56

Numerical Modeling of Coolant Mixing with REMIX Code \V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, A.V. Petrosyan, S.E. Yakush; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 13 pages, 7 illustrations. – References, 21 titles.

REMIX (REactor MIXing) code for numerical analysis of coolant mixing is developed in Electrogorsk Research and Engineering Centre on NPP Safety. In this paper the mathematical model and numerical scheme of REMIX code is described. REMIX code is verified on two test problems: laminar/turbulent pipe flow, and flow behind a backward-facing step. The REMIX code is applied to calculation of boron mixing in VVER-1000 NPP reactor after start of main coolant pump. The calculations show that the decrease in the average boron concentration at the core inlet reached 31%, while local concentrations dropped by 38%.

УДК 621.039.524

Physical Statutes of Reactor VVER-1000 Analyze and Management of Emergency Situations \A.N. Shkarovskii, V.I. Aksekov, N.P. Serdun'; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 9 pages, 4 illustrations. – References, 8 titles.

Physical categories of nuclear power installation (NPI) determined by physical process which pass in elements of it equipment are suggested and founded. It is shown that combination (configuration) of physical categories determines physical conditions of NPI. Methodic for analysis of physical categories for determination of physical conditions is given. Analysis of different physical conditions of NPI is conducted, methodic of decision acceptance by operator on management of emergency situation (in support of safety system) with the purpose of consistent conversion to the final (safety) condition is developed.

УДК 621.039.526: 621.039.546.8

Experimental Research of Hydraulic Parameters of Modified Fuel Assembly for RBMK-1000 Reactor \E.F. Avdeev, I.A. Chusov, V.A. Levchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 12 pages, 11 illustrations, 1 table. – References, 5 titles.

Main results of experimental research on hydraulic parameters of the RBMK-1000 modified fuel assembly are presented. Data on full friction for TC with fuel assembly and local friction of the inlet and outlet of fuel assembly taking into account TC diameter change are given. Influence of change in dissector longitudinal direction relative to rod bundle on the hydraulic parameters of inlet, outlet, and of the bundle at whole has been investigated. Results of local friction measurements for the single grid spacer of the typical fuel assembly are also given.

УДК 621.039.526

Influence of Track Geometry Deviation in Two-Loop Hydraulic Model on Total Hydraulic Friction Uncertainties \Yu.S. Yur'ev, Yu.D. Levchenko, I.A. Chusov, A.A. Kazantsev, I.N. Leonov; Editorial board of