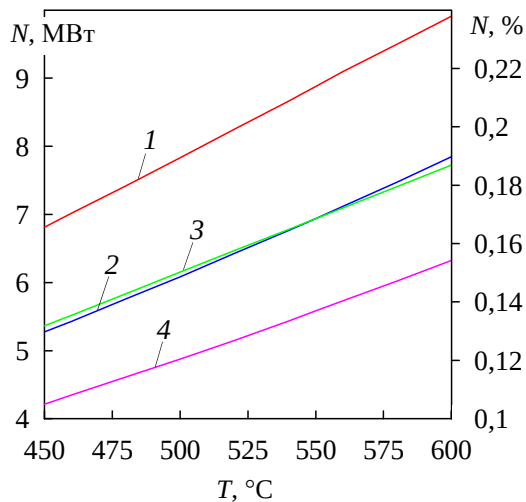




Р и с. 6. Зависимость мощности, отводимой в одной петле второго контура БН-1600, от температуры теплоносителя при высоте вытяжной трубы H 60 м, коэффициенте теплового излучения стенок ϵ 0,85 (1) и 0,25 (2), H 30 м, ϵ 0,85 (3) и 0,25 (4)

САОТ-2К вызовет лишь отказ одного канала (петли) системы, что, как показали расчеты, не приводит к отказу в выполнении функции аварийного теплоотвода и превышению пределов безопасной эксплуатации реакторной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Status of Fast Reactor Research and Technology Development. IAEA-TECDOC-1691. Vienna: IAEA, 2012.
2. Ashurko Yu.M., Lazarenko G.E. Characteristics of systems of emergency decay heat removal through reactor vessel wall and possible ways of their efficiency increase. — In: Proc. of an Intern. Top. Meeting on Sodium Cooled Fast Reactor Safety. Obninsk, 3—7 October, 1994, v. 4, p. 6.24—6.38.
3. Ашурко Ю.М. Система аварийного теплоотвода от контуров реакторной установки и оценка ее эффективности: Препринт ФЭИ-2913, 2001.
4. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник. Под общ. ред. А.Е. Шейншлина. М.: Энергия, 1974.

Поступила в Редакцию 3.10.17

УДК 621.311.25:621.039.5

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ВНУТРИРЕАКТОРНОГО КОНТРОЛЯ ВВЭР В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Семенухин А.В., Саунин Ю.В., Рясный С.И. (АО «Атомтехэнерго», г. Москва)

Надежность выполнения системой внутриреакторного контроля СВРК эксплуатационных задач во многом зависит от достоверности входной информации, поэтому диагностика состояния и достоверность показаний каналов контроля являются одной из важных штатных функций первичной обработки [1]. Кроме того, в соответствии с нормативными требованиями [2] при эксплуатации энергоблока проводятся периодические регламентные проверки и испытания СВРК с расширенным анализом показаний каналов, сложность и громоздкость которых определяются как их большим числом (~1 тыс.), так и методом проверки на достоверность, включающим «ручные» операции. При этом очевидно, что в период между регламентными проверками и испытаниями возможна вероятность функционирования системы с неявными и развивающимися дефектами, которые не выявляются штатными функциями диагностики. Поэтому в настоящее время определены требова-

ния к использованию на АЭС технологий диагностики в режиме реального времени [3—6]. В настоящей статье рассматривается один из методических подходов, использованный при разработке системы диагностики входной информации СВРК, функционирующей в режиме реального времени. Эта система диагностики была успешно опробована при вводе в эксплуатацию энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 [7]. Предлагаемый методический подход служит для автоматической оценки достоверности информации каналов СВРК и является развитием методов [8, 9], применяемых при обработке информации.

Основные положения методики. Для определения достоверности показаний каналов контроля анализируются среднее значение и погрешность измерения на выбранном интервале наблюдения. Под каналом контроля понимаются проектные программно-технические средства (первичные и вторичные преобразователи, ли-

нии связи, функциональные элементы информационно-измерительной аппаратуры и др.), с помощью которых измеряются, преобразовываются контролируемые параметры. На первом этапе анализа оценивается работоспособность канала контроля, исходя из предположения, что в стационарных режимах работы погрешность показаний должна быть меньше допустимой максимальной, обусловленной структурой и проектными метрологическими характеристиками. Предположение основывается на том, что если контролируемая величина постоянная, то результаты ее измерения от цикла к циклу не должны быть больше погрешности канала контроля. В противном случае можно говорить о наличии дефектов, которые не позволяют считать этот канал работоспособным. Если канал работоспособный, то анализируется среднее значение параметра, которое должно находиться в определенных границах в соответствии с режимными значениями для возможных эксплуатационных состояний. Таким образом, на первом этапе каналами контроля с достоверными показаниями признаются лишь те, для которых будут выполняться указанные два условия.

Для дальнейшей оценки достоверности учитывается избыточность каналов контроля, обусловленная конкретным проектом. Это означает, что один и тот же параметр контролируется несколькими параллельными каналами, а также другими системами контроля и управления. Такая проектная избыточность является дополнительным критерием достоверности, а именно если показания отдельного канала контроля отличаются от показаний группы параллельных или аналогичных других систем контроля управления более чем на предельно допустимую величину, то они могут быть признаны недостоверными. В качестве предельного отличия используется оценка максимальной погрешности при сравнении двух случайных величин с учетом особенностей структуры и метрологических характеристик сравниваемых каналов контроля.

Поэтому очевидно, что наиболее представительные оценки достоверности возможны только в стационарных режимах, когда показания анализируемых каналов контроля стабилизированы в допустимых интервалах изменения и находятся в рабочем диапазоне измерения. Поэтому в целом в системе диагностики, помимо оценок достоверности, существенную роль иг-

рает также автоматическое определение стационарности режима работы реакторной установки и выбора интервала времени для оценки достоверности [7]. Приведенные основные положения методики применимы для всех каналов СВРК при условии учета физических особенностей контролируемых параметров, расположения и характеристик первичных преобразователей, а также особенностей их структуры. Отмеченные особенности влияют на оценки погрешностей, режимных значений, допустимых отклонений в группах параллельных каналов контроля.

Максимальная допустимая погрешность показаний канала контроля. Максимально допустимая погрешность канала контроля оценивается на основании его структуры и проектных метрологических характеристик элементов с учетом нормативных документов [10]. Для большинства случаев оценка проводится в предположении, что погрешности элементов каналов контроля являются независимыми и подчинены нормальному закону распределения. Это предположение основано на анализе опытных данных для разнотипных каналов. В таком предположении суммарная погрешность канала контроля определяется геометрическим сложением

$$\sigma = \sqrt{\sum_i^n \sigma_i^2},$$

где σ_i , n — погрешность каждого элемента и их число в канале контроля соответственно.

Кроме погрешностей элементов канала контроля, в отдельных случаях следует учитывать дополнительные погрешности, которые могут характеризовать особенности условий измерения и/или поведения контролируемого параметра. Так, в каналах контроля температуры теплоносителя в горячих нитках необходим учет дополнительной погрешности из-за эффекта температурной стратификации [11]. Пренебрежение дополнительной погрешностью в таких каналах контроля может существенно исказить оценки достоверности.

Сравнение текущих параметров с режимными. При оценке достоверности сравнением с режимным значением проверяется выполнение условия

$$A_{\min} \leq A \leq A_{\max},$$

где A — текущее показание; $A_{\min}$, $A_{\max}$ — минимальное и максимальное режимное значение соответственно.

Такая оценка основывается на том, что эксплуатационное состояние и режимы работы реакторной установки строго определены технологическим регламентом безопасной эксплуатации. В этих определенных состояниях и режимах показания контролируемых параметров должны находиться в узких диапазонах, которые называются режимными и приводятся в проектной и/или эксплуатационной документации. При отсутствии информации о режимных параметрах для отдельных используется опыт пусконаладочных работ и эксплуатации на аналогичных энергоблоках.

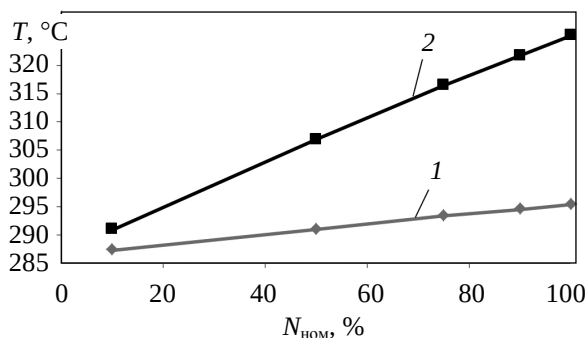
Режимные значения можно разделить на фиксированные и плавающие. Некоторые режимные параметры остаются фиксированными с учетом работы конкретного оборудования. Это означает, что такие режимные параметры строго связаны, например, с числом работающих главных циркуляционных насосных агрегатов (ГЦНА) и не зависят от других условий. К таким параметрам можно отнести перепад давления на ГЦНА, реакторе и др. Для других параметров нельзя установить фиксированные значения, поскольку их показания зависят от мощности реакторной установки. К таким параметрам относятся, например, температура теплоносителя в разных местах петель первого контура, токи датчиков прямой зарядки и др. Как правило, зависимость показаний таких параметров от мощности носит линейный характер (рис. 1).

Для определения плавающих режимных значений предлагаются следующие формулы:

$$A_{\min} = A_{\min 0} + K_{\min} K_n; \quad (1)$$

$$A_{\max} = A_{\max 0} + K_{\max} K_n; \quad (2)$$

где $A_{\min}$, $A_{\max}$ — минимальное и максимальное режимное значение; $A_{\min 0}$, $A_{\max 0}$ — константы,



Р и с. 1. Зависимость температуры в холодных (1) и горячих петлях первого контура от мощности реакторной установки

определяющие минимальное и максимальное режимное значение при нулевой мощности реакторной установки; $K_{\min}$, $K_{\max}$ — коэффициент зависимости параметра мощности для минимального и максимального режимного значения соответственно; K_n — коэффициент, соответствующий текущему уровню мощности реакторной установки, имеющий значение 0 для нулевой и 1 для мощности 100% $N_{\text{ном}}$.

Формулы (1), (2) позволяют задавать режимные значения и для тех параметров, которые не зависят от мощности. Для этого достаточно задать значения $K_{\min}$ и $K_{\max}$, равные нулю. Поэтому эти формулы можно использовать для любых параметров.

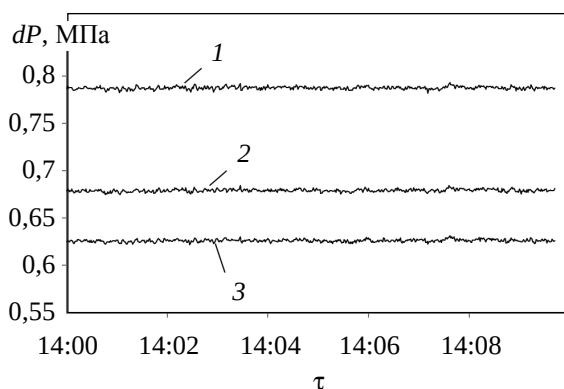
Расчет средних показаний параллельных каналов контроля. Как было указано, одним из способов оценки показаний канала контроля на достоверность является сравнение его показаний с показаниями параллельных каналов контроля. Например, в проектах, где в СВРК формируются сигналы защиты по локальным параметрам, для контроля перепада давления на ГЦНА предусмотрено 4—6 каналов. При этом в дальнейших расчетах на верхнем уровне СВРК используется среднее значение. Отличия показаний параллельных каналов контроля могут быть обусловлены погрешностью измерения контролируемого ими параметра. Для проверки на достоверность можно предложить несколько способов. Во всех способах предполагается, что в группе параллельных каналов контроля либо все каналы достоверны, либо их большая часть. Если в группе параллельных каналов все показания недостоверны, то проверка на соответствие показаний параллельных каналов даст неправильный результат. Однако в этом случае с большой вероятностью все эти каналы контроля будут иметь общую причину недостоверности и отбракованы по признаку либо неработоспособности, либо несоответствия режимным параметрам.

Наиболее распространенное и простое для реализации решение — рассчитать среднее значение по показаниям всех параллельных каналов контроля и сравнить с показаниями каждого канала в одной группе. Однако такое решение имеет существенный недостаток, связанный с тем, что в случае, если в группе параллельных каналов имеется хотя бы один канал с показаниями, существенно отличающимися от показаний

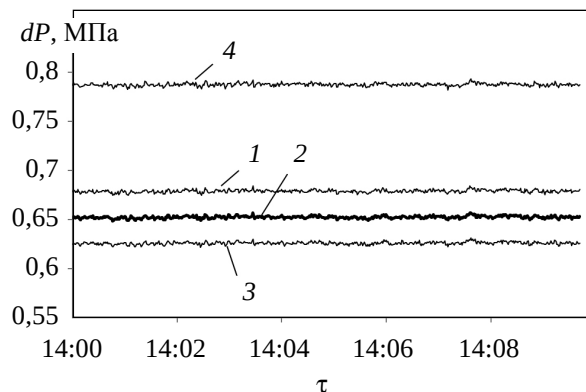
остальных каналов, то среднее значение по всем каналам будет значительно отличаться от среднего по совокупности достаточно близких по значению каналов. Это может привести к такой ситуации, при которой критерий по соответствию показаний отдельного канала контроля показаниям параллельных каналов не будет выполнен для всех каналов группы и будут признаны недостоверными показания как канала контроля с сильно отклоняющимися показаниями, так и остальных. На рис. 2 показана крайняя ситуация, когда отбраковываются все три канала контроля из трех, тогда как в действительности только один канал имеет недостоверные показания и они существенно отличаются от показаний остальных каналов. Чаще встречается ситуация, когда показания одного канала существенно отличаются от остальных, но их показания близки к допустимым. В таком случае при использовании среднего значения по всем каналам имеется вероятность признания недостоверными показаний одного из каналов, имеющих в действительности достоверные показания. По этой причине такой метод сравнения параллельных каналов контроля является не совсем корректным.

Наиболее логичным является сравнение показаний отдельного канала контроля со средним по остальным параллельным каналам (рис. 3). Канал контроля с недостоверными показаниями (кривая 4) будет отбракован по причине значительного отклонения от других параллельных каналов.

Наиболее устойчивым к определению в группе канала с недостоверными показаниями



Р и с. 2. Показания трех каналов контроля перепада давления на ГЦНА и среднее значение с возможной некорректной отбраковкой достоверных показаний двух каналов контроля: 1 — канал контроля с недостоверными показаниями; 2 — среднее значение по трем каналам; 3 — два канала контроля с близкими показаниями



Р и с. 3. Показания трех каналов контроля перепада давления на ГЦНА и среднее значение с отбраковкой недостоверных показаний первого канала контроля: 1, 3 — параллельные каналы контроля; 2 — среднее значение параллельных каналов контроля; 4 — канал контроля с недостоверными значениями

является расчет медианного значения. Для этого первоначально все значения в группе параллельных каналов необходимо отсортировать в порядке возрастания. Далее медианное значение рассчитывается по формуле

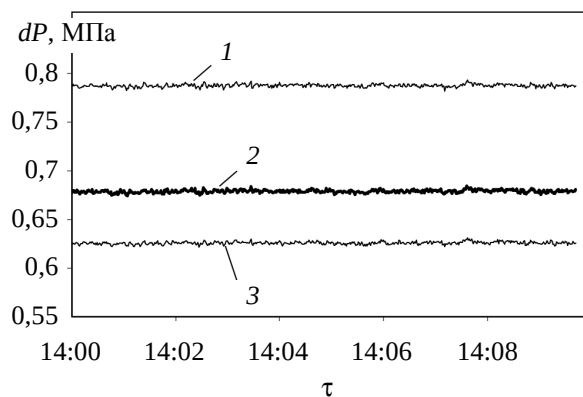
$$Me = X_{n+1}/2,$$

если число параллельных каналов нечетное, и по формуле

$$Me = \frac{X_{n/2} + X_{n/2+1}}{2},$$

n — число параллельных каналов в группе, если число параллельных каналов четное.

На рис. 4 приведены показания каналов контроля перепада давления на ГЦНА и медианное значение. Видно, что канал контроля с недостоверными показаниями будет определен корректно.



Р и с. 4. Показания каналов контроля перепада давления на ГЦНА и медианное значение с отбраковкой недостоверных показаний одного канала контроля: 1 — канал контроля с недостоверными значениями; 2 — медианное значение; 3 — параллельный канал контроля

Допустимое отклонение показаний в группе параллельных каналов контроля. Критерий достоверности при сравнении показаний в группе параллельных каналов контроля, которые в большинстве своем удовлетворяют условиям равноточности измерений, записывается в виде

$$|X_i - X_{II}| < \psi,$$

где X_i — значение i -го канала; X_{II} — среднее значение параллельных каналов; ψ — допустимое отклонение.

Допустимое отклонение представляет собой сумму погрешности измерения отдельного канала и погрешности среднего значения параллельных каналов:

$$\psi = \sigma_i + \sigma_{II}, \quad (3)$$

где σ_i — погрешность i -го канала контроля; σ_{II} — погрешность среднего значения параллельных каналов.

Погрешность среднего значения σ_{II} при сравнении проверяемого канала контроля с остальными рассчитывается по формуле

$$\sigma_{II} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N-1} (\sigma_j)^2}{(n-1)^2}},$$

где n — число параллельных каналов контроля; σ_j — погрешность j -го канала контроля из группы параллельных каналов.

Как правило, параллельные каналы контроля имеют одинаковую структуру и построены на одной элементной базе, поэтому их погрешность σ_i будет одинаковой. Следовательно, формулу можно переписать в виде

$$\sigma_{II} = \sigma_j / N. \quad (4)$$

Допустимое отклонение при отсутствии параллельных каналов контроля, удовлетворяющих условиям равноточности измерений, определяется на основе опытных данных и учета дополнительных погрешностей за счет различия структур сравниваемых каналов.

Приведем пример расчета допустимого отклонения в группе параллельных каналов контроля перепада давления на ГЦНА по данным для энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2. В проекте для данного параметра предусмотрено шесть каналов контроля, погрешность отдельного канала оценена 0,006 МПа. По форму-

лам (3), (4) рассчитаем, что допустимое отклонение в этой группе параллельных каналов равно 0,007 МПа. При использовании медианного способа погрешность параллельных каналов контроля можно оценить по максимальной погрешности. Максимальная погрешность медианного значения будет равна погрешности одного канала $\sigma_{II} \leq \sigma_j$. Допустимое отклонение по формуле (3) в этом случае будет равно двум σ_j . Подставив значения в формулу (3), получим 0,012 МПа. Как видно, это допустимое отклонение оказывается существенно больше допустимого отклонения при использовании способа сравнения показаний одного канала контроля со средним значением по показаниям остальных каналов в группе. Поэтому имеется вероятность ошибочного признания показаний достоверными для канала контроля, который в действительности имеет недостоверные показания. Следовательно, такая возможная ошибка из-за большого допустимого отклонения является недостатком этого способа оценки.

Однако следует признать, что такая оценка погрешности медианного значения является излишне консервативной. Поэтому предлагается иной способ оценки погрешности параллельных каналов контроля. Поскольку медианное значение по сравнению со средним всегда ближе к действительному, то можно предположить, что погрешность всегда меньше или, в крайнем случае, равна погрешности среднего значения для нескольких случайных величин. Соответственно для оценки погрешности измерений параллельных каналов контроля можно использовать формулу (4). В этом случае погрешность параллельных каналов σ_{II} равна 0,001 МПа, допустимое отклонение 0,007 МПа и оно даст наиболее приемлемые оценки достоверности.

Заключение. Представленная методика определения достоверности информации каналов СВРК включает способы оценки допустимой максимальной погрешности каналов, среднего значения и допустимого отклонения показаний в группах параллельных каналов, а также метод оценки достоверности сравнением значения параметра с режимным значением.

Основные положения методики соответствуют требованиям, заложенным в программном обеспечении системы «Диагностика СВРК», которая прошла успешное опробование при вводе в эксплуатацию энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинушкин А.Е., Козлов В.В., Митин В.И., Семченков Ю.М. Система контроля, диагностики и управления для ЯЭУ большой мощности с водо-водяными реакторами. — Атомная энергия, 2009, т. 106, вып. 1, с. 3 — 8.
2. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (НП-001-15). М., 2015. 74 с.
3. On-line Monitoring for Improving Performance of Nuclear Power Plants. Pt 1. Instrument Channel Monitoring. Vienna: IAEA, 2008. 122 p.
4. On-line Monitoring for Improving Performance of Nuclear Power Plants. Pt 2. Process and Component Condition Monitoring and Diagnostics. Vienna: IAEA, 2008. 82 p.
5. Хашемин Х.М. Техническое обслуживание измерительных устройств на атомных электростанциях. М.: Изд-во БИНОМ, 2012. 350 с.
6. Алыев Р.В. Распознавание состояния активной зоны и анализ достоверности информации системы внутриреакторного контроля при эксплуатации топливных загрузок ВВЭР-1000. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Обнинск, МИФИ, 2013. 22 с.
7. Семенихин А.В., Саунин Ю.В., Жук М.М. Опробование системы диагностики информации СВРК на блоке № 1 НВАЭС-2. Тезисы докл. 10-й Межд. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 16—19 мая 2017 г., с. 98.
8. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. Разработка и применение специализированного программного обеспечения при проведении комплексных испытаний системы внутриреакторного контроля реакторов ВВЭР. — Тяжелое машиностроение, 2008, № 11, с. 18—22.
9. Саунин Ю.В. Разработка методик комплексных испытаний систем внутриреакторного контроля ВВЭР. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Екатеринбург, УПТИ, 2010. 30 с.
10. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации. РМГ 62—2003. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. 19 с.
11. Saunin Yu.V., Dobrotvorski A.N., Semenikhin A.V. e.a. Numerical and experimental investigation of 3D coolant temperature distribution in the hot legs of primary circuit of reactor plant with WWER-1000. — Kerntechnik, 2015, v. 80, № 4, p. 366—372.

Поступила в Редакцию 20.07.17

УДК 621.039.536.24.08

ТЕПЛОТДАЧА И НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПУЧКАХ СТЕРЖНЕЙ С РАЗНЫМ ДИСТАНЦИОНИРОВАНИЕМ, ОХЛАЖДАЕМЫХ ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Кузина Ю.А., Сорокин А.П. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского», г. Обнинск)

Для разработки быстрых реакторов нового поколения, характеризующихся высокими энергонапряженностью, температурой твэлов, требуются надежные данные о теплогидравлике активной зоны (теплотдаче, температурном режиме твэлов и др.), которая является одной из важных в обосновании конструкции и режимных параметров.

В настоящее время отсутствуют количественные данные, которые характеризуют теплообмен в свободных решетках твэлов, характерных для активной зоны быстрых реакторов нового поколения со свинцовым теплоносителем при разных видах дистанционирования твэлов. Получение этих данных наряду с коэффициентами гидравлического сопротивления позволяет замкнуть систему констант для поканального метода теплогидравлического расчета, учитывающего влияние пространственных неоднородностей геометрии и энерговыделения, являющегося эффективным инструментом на стадии

технических проектов, а также при анализе эксплуатационных режимов.

ТЕПЛОТДАЧА И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В РЕШЕТКАХ ГЛАДКИХ ТВЭЛОВ

Коэффициенты теплотдачи гладких твэлов с жидкометаллическим охлаждением получены на основании исследований для решеток твэлов в широких интервалах изменения определяющих параметров — $1 \leq s/d \leq 1,95$, $4 \leq Re \leq 3500$, $0,007 \leq Pr \leq 0,03$, $0,02 \leq \epsilon \leq 16$. Это позволило выявить основные закономерности теплообмена в решетках гладких твэлов с жидкометаллическим охлаждением и получить универсальные расчетные формулы.

Для обобщения чисел Нуссельта принята формула ($\epsilon \geq 0,01$, $1 \leq s/d \leq 2$, $1 \leq Re \leq 4000$) [1—3]

$$Nu = Nu_{\text{л}} + f(\epsilon, x) Re^{\varphi(x)}, \quad (1)$$