

КРИТИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СБОРКАХ ТВЭЛОВ В ТРЕУГОЛЬНОЙ УПАКОВКЕ

В.П. Бобков, А.Д. Ефанов, И.П. Смогалева, Р.С. Пометько
Россия, ГНЦ РФ – ФЭИ, Обнинск

Доклад посвящен модифицированному методу описания и расчета критических тепловых потоков (КТП) в треугольных сборках цилиндрических ТВЭЛОВ при равномерном и неравномерном энерговыделении. Рассматриваются **три основных вопроса**: табличный метод описания КТП в сборках при равномерном энерговыделении [1], различные методы описания поправки на неравномерное по длине энерговыделение и применение разработанного табличного метода к расчету КТП при поэлементном анализе.

Табличный метод создан на основе многочисленных экспериментальных данных. В качестве экспериментальных данных с равномерным энерговыделением нами использованы экспериментальные данные, полученные на 49 экспериментальных сборках (5300 точек) в широком диапазоне режимных и геометрических параметров: давление от 0,11 МПа до 20 МПа, массовая скорость от 25 до 5000 кг/(м²с); балансное паросодержание от –0,5 до 1,0; обогреваемая длина стержней (L) от 0,8 до 7,0 м; диаметр стержней от 5 до 13,5 мм; тепловой диаметр ячеек от 2,42 до 21 мм; относительный шаг стержней от 1,02 до 1,52; количество стержней в сборках: 7, 19, 20 и 37. Степень "несбалансированности" использованных для анализаборок (d_h/d_{h1}) составляла от 0,42 до 0,93. Указаны крайние пределы, охватывающие все данные, полученные в разных областях параметров и включенные в базу данных ФЭИ. В анализ включены также новые экспериментальные данные для тех областей параметров, где ранее их не было.

КТП при равномерном энерговыделении.

Величина критического теплового потока в пучках стержней зависит от большого количества факторов [1, 2, 3]. Кроме режимных параметров (давление, скорость, паросодержание) на КТП существенное влияние оказывают: поперечный масштаб канала, геометрия поперечного сечения, турбулизация потока дистанционирующими решетками, величина периферийных зон и зон вблизи стержней без энерговыделения. Для коротких каналов на КТП может оказывать влияние и расстояние от места кризиса до входа в канал. В итоге анализ экспериментальных данных показывает, что метод расчета КТП в таких сборках даже с равномерным энерговыделением по длине и сечению должен учитывать влияние следующих параметров: $q_{кр}=f(P, G, X, d_h/d_{h1}, s/d, L/d_h, K_f, Z/d_h)$, где P - давление, G - массовая скорость, X - балансное паросодержание в месте кризиса, d_h - тепловой диаметр внутренней ячейки сборки, d_{h1} - тепловой диаметр всего сечения сборки, s/d - относительный шаг стержней, L/d_h - относительное расстояние от места кризиса до входа в сборку, K_f - коэффициент, учитывающий влияние дистанционирующей решетки, Z/d_h - относительное расстояние от места кризиса до ближайшей дистанционирующей решетки.

Табличный метод [2] был модифицирован и описан в статье [1]. Модифицированный метод расчета КТП представляет собой систему, состоящую из модифицированной таблицы и поправочных функций. Он обеспечивает более высокую точность расчета в более широком диапазоне режимных параметров, охватывающих все данные ЦТД ФЭИ по сборкам с треугольной упаковкой. Учет теплогидравлической неравноценности экспериментальныхборок позволил приблизить метод к требованиям межъячеечного анализа.

Модифицированная таблица получена для следующих условий: для максимально сбалансированныхборок когда $d_h/d_{h1}=1$; для случая, когда нет турбулизующего влия-

ния дистанционирующих решеток; для случая, когда нет влияния входного участка от места кризиса до входа в сборку ($L/d_h > 300$).

КТП по модифицированному методу рассчитывается по соотношению (1):

$$q_{кр} = q_m \cdot K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 F \quad (1)$$

где q_m - критические тепловые потоки согласно таблице в конце статьи, разработанной для базовой сборки с параметрами: $s/d=1,4$; $d_h=9,36$ мм, $d_h/d_{h1}=1$ и $L/d_h > 300$;

K_1 - поправка на тепловой диаметр ячейки,

$K_1 = F(d_h) = (d_h/9,36)^{-1/3}$, где $d_h = d[1,103(s/d)^2 - 1]$;

K_2 - поправка на относительный шаг расположения стержней,

$K_2 = F(s/d) = 0,82 - 0,7 \exp[-35(s/d - 1)]$ при $s/d \leq 1,1$ (до 1,02) и $K_2 = F(s/d) = 0,2 + 0,57s/d$ при $s/d > 1,1$ (до 1,52), $K_2 = F(s/d)$ - поправка на относительный шаг;

K_3 - поправка на влияние входных условий сборки (относительного расстояния от места кризиса до входа в сборку - L , которая совпадает с длиной обогрева при равномерном по длине энерговыделении),

$K_3 = F(L/d_h) = 1,0 + 0,6 \exp(-0,01L/d_h)$

K_4 - поправка на турбулизирующее влияние дистанционирующих или смесительных решеток (принято по рекомендациям работы [7]),

$K_4 = F(k_f) = 1 + A \exp(-0,1Z/d_h)$,

где $A = 1,5 K_f^{0,5} (G/1000)^{0,2}$,

K_f - коэффициент местного сопротивления решетки;

K_5 - поправка на теплогидравлическую неравноценность экспериментальной сборки,

$K_5 = F(d_h/d_{h1}) = d_h/d_{h1}$.

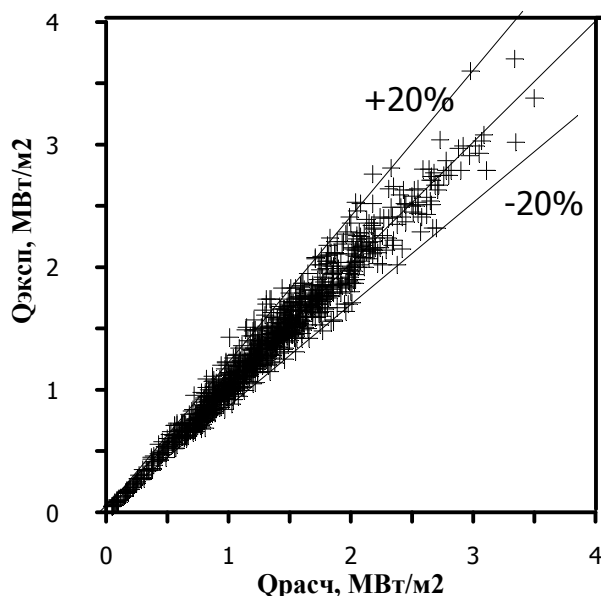


Рис. 1. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными при равномерном энерговыделении (по входным параметрам)

Поправочные функции $K_1 \div K_5$ получены в следующем диапазоне параметров: тепловые диаметры - от 2,4 до 21 мм; шаги расположения стержней - от 1,02 до 1,52; относительные расстояния от места кризиса до входа в сборку - L/d_h от 40 до 1440; параметры теплогидравлической неравноценности - d_h/d_{h1} от 0,4 до 1,0.

Следует отметить, что интервалы изменения поправочных функций $K_1 \div K_5$ в рассмотренном диапазоне опытных данных относительно невелики и составляют: $F(d_h)=0,8 \div 1,35$; $F(s/d)=0,6 \div 1,08$; $F(L/d_h)=1,0 \div 1,21$; $F(k_f)=1,0 \div 1,65$; $F(d_h/d_{hl})=0,42 \div 1$.

Модифицированный метод описывает экспериментальные данные (5300 точек, 49 сборок) с ошибками:

- по локальным параметрам средняя ошибка описания всех данных близка к нулю, среднеквадратичная ошибка не превышает 15 %;
- по входным параметрам средняя ошибка описания всех данных также близка к нулю, а среднеквадратичная ошибка не превышает 8 % (см. рис. 1).

Влияние на КТП продольной неравномерности.

В реакторных условиях на КТП существенно влияет неравномерность энерговыделения по высоте сборки, изменяющееся в процессе эксплуатации (на протяжении кампании).

До настоящего времени нет единого, устоявшегося, более или менее универсального, метода учета влияния продольно-неравномерного энерговыделения (форм-фактора F) на локальную величину критического теплового потока в сборках твэлов при любой схеме их расположения в пучке. В литературе имеются различные частные формулы для труб, кольцевых каналов, квадратных и треугольных сборок. Это корреляции Вильсона и др. [4], Тонга [5], Грюневельда и Ли [6], Смолина и Полякова [7,8], Осмачкина и Лысцово [9,10], Безрукова и др. [11]. На данном этапе исследования форм-фактора F есть все основания полагать, что достижения в описании F для одних геометрий каналов не могут быть использованы для других геометрий каналов. Это уже было многократно проверено во многих работах разных авторов.

Поэтому совершенно необходимы дальнейшие работы по поиску эффективных, точных и достаточно универсальных методов расчета влияния продольно-неравномерного энерговыделения как в экспериментальном так и в теоретическом планах. Но прежде интересно еще раз показать, как подходящие опубликованные методы описывают доступные данные, имеющиеся в ЦТД ФЭИ для треугольных сборок. В настоящей работе эти данные были представлены в виде, удобном для использования в расчетах, в том числе, для возможных в будущем поэлементных расчетов.

Какие данные имеются в нашем распоряжении? Это данные ОКБ «ГИДРО-ПРЕСС» при 2 различных эпюрах энерговыделения [11, 12], данные ЭНИН при симметричном ступенчатом косинусе [13, 14] и данные Чешского завода «SCODA» для симметричного, но несколько необычного, энерговыделения. Данные получены на 7-стержневых сборках различной длины. Основные характеристики сборок приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики экспериментальных сборок и эпюр энерговыделения для них.

Ор-я	L, м	Do, мм	S/d	Обогр. перим. Ро, м	Прох. сечен. F_s , м ²	Число точек	$2\Delta Z/L$	$\Delta Q^*_{z,max}$	N ст
ОКБ1	2,5	9	1,4	0,1979	0.0006461	174	0	0,36	7
ОКБ2	2,24	9	1,4	0,1979	0.0006461	113	1,0	0,2	7
ЭНИН	2,5	9,1	1,34	0,2001	0.0005984	51	0	0,56	7
Шкода	3,5	9	1,4	0,1979	0,0006461	58	0	0,36	7

Данные по критическим тепловым потокам в этих массивах получены для случаев, когда кризис наступал во внутренних ячейках сборок, но массовые скорости и балансные паросодержания являются осреднёнными по сечению значениями.

Методы расчета влияния неравномерного по длине энерговыделения в треугольных сборках (форм-фактора F)

1. Квази-равномерное энерговыделение. Прежде всего, была необходимость проверить простейший подход в предположении, который иногда имеет место, **что $F=1$** . Получим ответ на вопрос, как метод для равномерного энерговыделения описывает эксперименты при неравномерном энерговыделении напрямую. Это означает, что в каждом сечении (предполагается) критический тепловой поток при неравномерном энерговыделении равен КТП при равномерном энерговыделении, но при локальных (средних по сечению) паросодержаниях, полученных по балансу тепла при неравномерном энерговыделении: $F=1$.

2. Метод ОКБ-ГП, рекомендованный в [11] для ВВЭР-440

Форм-фактор ОКБ "Гидропресс" имеет вид:

$$F = \left[\frac{\int_{z-0.72}^z q(z') dz'}{0.72q(z)} \right]^n \quad (2)$$

$$n = 3.79 - 19.61 \frac{p}{p_{cr}} + 17.86 \left(\frac{p}{p_{cr}} \right)^2$$

где z - продольная координата, м; $p_{cr} = 22,115$ МПа - критическое давление.

3. Метод, предложенный ранее в ФЭИ (ФЭИ1).

Для получения этой эмпирической поправочной функции, описывающей сносно все использованные данные, были выбраны два параметра $S_{лок}$ и $|D|_{1/2}$, которые не приводят к скачкам в зависимости этой функции от длины.

$$S_{лок} = \int_0^z Q^*(Z') dZ', \quad (3)$$

т.е. величина, пропорциональная доли подведенной мощности,

$$|D|_{1/2} = dQ^*(Z)/dZ|_{Z_{max}-Z_{min}} \approx |[Q^*_{max}(Z_{max}) - Q^*_{min}(Z_{min})]/(Z_{max} - Z_{min})|, \quad (4)$$

т.е. модуль среднего градиента теплового потока на ниспадающем участке. На важность использования этого параметра было указано в [15].

Зависимость от этих параметров была подобрана с использованием всех данных. В результате было получено эмпирическое выражение для поправочной функции следующего вида:

$$f(S_{лок}, D_{1/2}) = (2.657 - 2.096 \cdot S_{лок}) \cdot (1.351 - 0.387 \cdot S_{лок}) \cdot (0.547 + 0.596 \cdot |D_{1/2}|) \quad (5)$$

4. Новый метод, разработанный в ЦТД ФЭИ в рамках данного исследования (ФЭИ2).

Разработка этого метода была необходима, т.к. прежние методы пока не являются удовлетворительными по универсальности и точности описания данных.

При рассмотрении различных методов расчета поправки на неравномерное по длине энерговыделение было принято во внимание, что форм-фактор может зависеть от следующих факторов:

– от эпюры изменения КТП по продольной координате, т.е. от характера изменения теплового потока по длине. Сюда относятся следующие величины: (1) относительная величина реализованного потока в месте предполагаемого кризиса, (2) положение максимума энерговыделения (см. рис.2). Предположим, что для гладких эпюр этих величин достаточно для отражения характера эпюры энерговыделения;

– от давления, от массовой скорости и от паросодержания в месте кризиса (некоторые авторы обнаружили такие зависимости;

– очевидно, что форм-фактор должен стремиться к единице при приближении эпюры к форме равномерного распределения.

При анализе приведенных здесь экспериментальных данных, полученных при неравномерном (симметричном и несимметричном) продольном распределении энерговыделения нами обнаружена явная зависимость F от **массовой скорости** (до 25 %), которая описывается соотношением $F(g)$, некоторая зависимость от давления $F(P)$, некоторая зависимость F (до 10 %) от относительной величины потока в месте предполагаемого кризиса (функция $F(b)$) и довольно заметная (до 10 %) зависимость от некоторого фактора формы эпюры ($F(f)$), отражающего несимметричность и степень неравномерности эпюры ΔQ^*_{zmax} . Привлекая имеющиеся экспериментальные данные, была получена следующая система соотношений для форм-фактора F :

$$F = \{1 + [FF - 1] [\Delta Q^*_{zmax} / 0,54]\} F(Q); \quad (6)$$

$$FF = F(P) F(G) F(f)$$

$$F(Q) = (Q^*_z)^{0,5}$$

$$F(g) = 0,8 \{1 + 0,5 \exp[-3,46 \cdot 10^{-3} (G - 400)]\};$$

$$F(P) = 1,98 - 0,000166P + 6,815 \cdot 10^{-9} P^2;$$

$$F(f) = 1 + 0,5f.$$

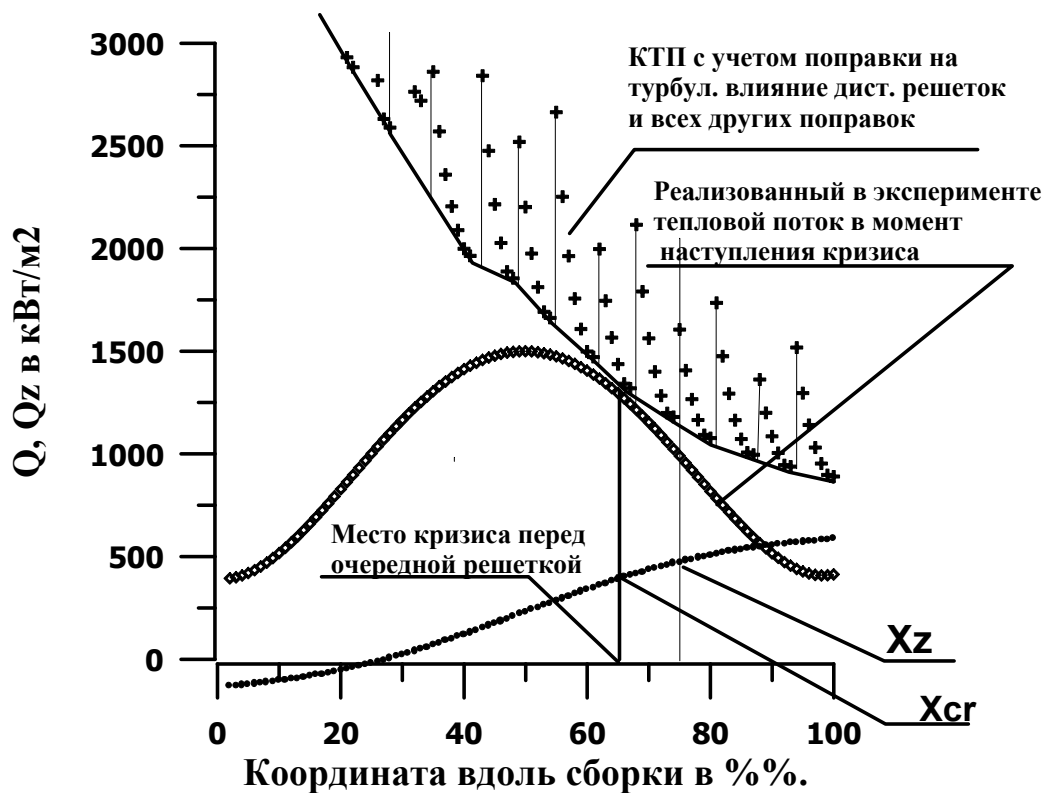


Рис. 2. Пример распределения тепловых потоков при симметричном косинусоидальном энерговыделении

где $f=2\Delta z/L$, Δz - смещение координаты максимума от середины сборки в любом направлении (вверх или вниз) (P в кПа). При стремлении f к нулю его влияние исчезает. При стремлении $Q^*_{zmax} = Q_{zm}/Q_{ev}$ к единице (равномерное по длине энерговыделение) форм-фактор F по (6) стремится к единице.

Анализ данных и верификация методов расчета.

Выбор метода сравнения.

Надежно влияние неравномерности энерговыделения можно получить из сравнения экспериментальных данных, полученных в условиях неравномерного энерговыделения с данными, полученными в условиях равномерного энерговыделения, но при идентичных других определяющих параметрах. Описанные выше экспериментальные данные (4 массива) различаются между собой многими геометрическими и режимными условиями: эпюрами энерговыделения, длиной канала, конструкцией дистанционирующих решеток, расстоянием между ними, величиной неравномерности энерговыделения по сечению и др. Так как подобрать подобные экспериментальные данные для равномерного энерговыделения по длине оказалось невозможным, выбран другой путь сравнения: используется метод, учитывающий все значимые определяющие параметры и, потому, дающий возможность задать этот уровень сравнения. Такими свойствами обладает модифицированный метод ФЭИ, описанный выше и находящийся в печати [1]. Форм-фактор F принимался по описанным выше методам.

Результаты анализа данных при использовании описанных выше методов для F приведены в таблице 2.

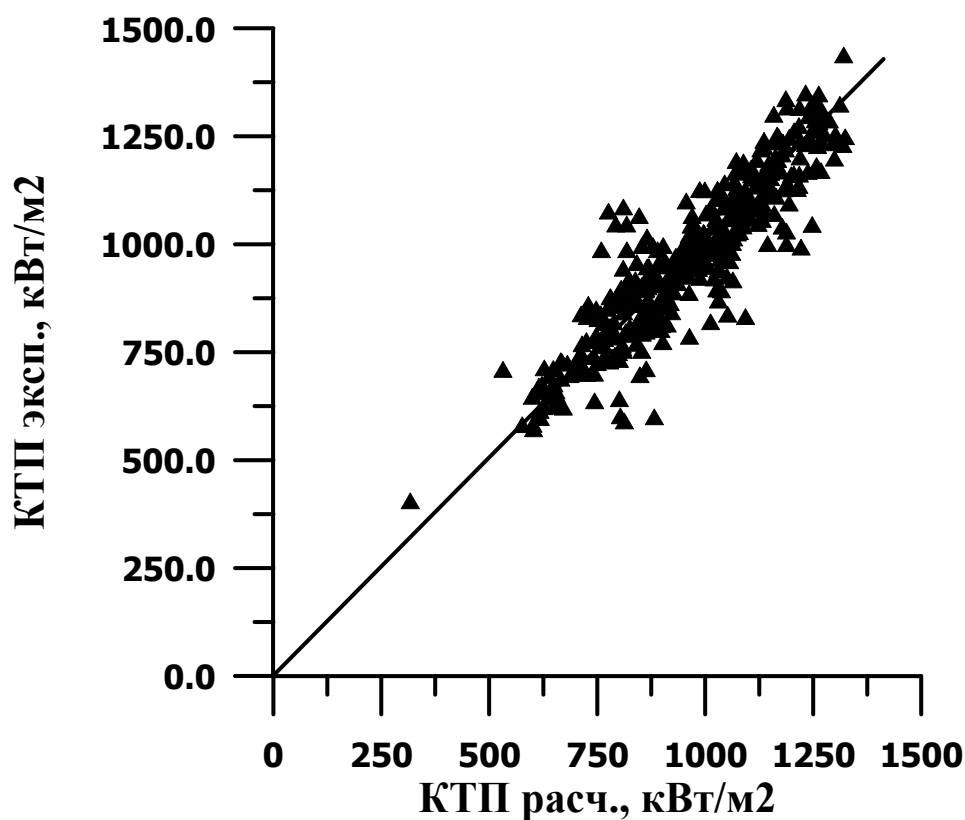


Рис. 3. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными при неравномерном энерговыделении (по локальным параметрам)

Таблица 2.

Результаты анализа данных при использовании описанных выше методов для F.

Органи- зация	F=1 ΔQ , %	F=1 σ , %	ГП ΔQ , %	ГП σ , %	ФЭИ1 ΔQ , %	ФЭИ1 σ , %	ФЭИ2 ΔQ , %	ФЭИ2 σ , %	ФЭИ1 ΔZ , %	ФЭИ1 σ , %	ФЭИ2 ΔZ , %	ФЭИ2 σ , %
ОКБ (1)	-25	8,5	-12	29	-5,5	23,4	-1	8,1	3,8	9,2	4	8,5
ОКБ (2)	-27	7,7	0,2	12	23,7	24	2	7,7	3,1	8,8	-3,3	3,8
ЭНИН	-16	11	81	86	11,5	26,2	11	9,6	-14	17,6	0,1	3,1
Шкода	-25	18	-26	47	-2,1	17,1	1	16	11,2	16,6	2,2	5,8
По всем	-25	8,5	3	41	5,5	23,1	1,5	10,5	2,4	11,8	1,1	7,15

Сравнение данных по таблице 2 показывает, что последний метод ФЭИ2 дает наилучшие результаты как по величине КТП, так и по координате места кризиса. На рис 3 приведено сравнение расчета по методу ФЭИ2 с экспериментальными данными.

Следует, однако, признать, что ни один из представленных здесь методов не может считаться окончательно обоснованным из-за малого количества испытанных экспериментальных сборок и малого количества разнообразных эпюр энерговыделения, имеющих в нашем распоряжении.

Модифицированный метод может быть использован как для расчета КТП по средним по сечению параметрам сборки (тогда используются все поправки), так и при ячейочном расчете.

Об алгоритме расчета КТП при ячейочном расчёте сборок.

Модифицированный метод описания КТП, разработанный в ФЭИ и представленный здесь (таблица и необходимые поправочные функции), наиболее пригоден к расчёту КТП при ячейочном методе анализа. Уверенность в этом основана на большом опыте анализа экспериментальных данных, накопленном в ФЭИ и, особенно, на том, что удалось найти зависимость КТП от локальных параметров (или существенно приблизиться к такой зависимости), а не использовать получающиеся из эксперимента зависимости КТП от осредненных по сечению сборки параметров, как это предлагается в ряде работ.

Как известно, ячейочный теплогидравлический расчет сборки, в частности, дает значения режимных параметров по длине в каждой ячейке проходного сечения сборки. Эти значения и используются для расчета КТП в ячейках сборки. Рекомендуем рассчитывать КТП по соотношению (1), если ячейки «правильные». Что такое «правильная» ячейка? Это ячейка между одинаковыми и одинаково обогреваемыми твэлами.

При ячейочном анализе возникает проблема описания КТП и в ячейках, существенно отличающихся от «правильной» ячейки сборки. В сборке могут оказаться ячейки около необогреваемой обечайки или около необогреваемого стержня (НК), или около стержня с отличным от остальных стержней энерговыделением, или в углу сборки, или ячейки другого размера и т.д. Как в этих случаях рассчитать КТП?

1. По модифицированной таблице определяем Q_t при известных по ячейкам режимным параметрам, используя линейную или квадратичную интерполяцию.

Очевидно, что переход к локальным параметрам позволяет избавиться сразу от двух поправок K_5 и K_6 (на теплогидравлическую неравноценность и на радиальную неравномерность энерговыделения).

2. Определяем $K_1 = (d_h/9,36)^{-1/3}$ – поправочную функцию на величину теплового диаметра каждой ячейки. Обращаем внимание, что в качестве определяющего диаметра при расчете КТП в ячейках следует использовать тепловой диаметр ячейки (четыре площади проходного сечения ячейки S , поделенные на обогреваемый периметр ячейки P_o : $d_h = 4S/P_o$).

3. Поправочная функция на относительный шаг $K_2 = -1,41 + 2,86(s/d) - 0,78(s/d)^2$ получена как для «правильной» ячейки. Для других ячеек в качестве относительного шага следует использовать величину (некий эквивалент относительного шага) $(s/d) = 1 + \delta/D$, где δ – средняя величина минимального зазора между стержнями, D – средний диаметр ближайших стержней, ограничивающих данную ячейку.

Другие поправочные функции не требуют пояснения.

Заключение

Создана модифицированная таблица и модифицированный метод для описания критических тепловых потоков в водоохлаждаемых сборках стержневых ТВЭЛов с введением новой поправочной функции на теплогидравлическую неравноценность сборки. Использованный подход при создании таблицы дает основание считать ее пригодной для использования в программах межъячейкового анализа при определении запасов до кризиса теплообмена. Метод описывает КТП в широком диапазоне параметров со среднеквадратичной погрешностью по входным параметрам не более 8 %, а по локальным – не более 15 %.

Показано, что имеются обширные «белые области» в системе параметров, не обеспеченные или мало обеспеченные экспериментальными данными. На основе анализа можно наметить пути дальнейших экспериментальных исследований КТП с целью заполнения «белых областей» экспериментальными данными и, следовательно, повышения надёжности и точности расчетных рекомендаций, относящихся, в первую очередь, к областям, характерным при нарушениях нормальной эксплуатации и к аварийным режимам энергетических установок.

Следует подчеркнуть, что данный табличный метод с поправками на влияние различных факторов необходимо считать методом *систематизации и обобщения* имеющихся экспериментальных данных и рекомендуется *в качестве оценочного предварительного метода для оптимизационных расчетов*. Из-за наличия обширных белых областей и малого количества экспериментального материала по влиянию различных факторов, особенно, влиянию неравномерного по длине энерговыделения имеется необходимость серьезного экспериментального исследования этого влияния.

Модифицированный метод может быть использован для расчетов КТП при равномерном и неравномерном по длине и сечению энерговыделении как по средним по сечению параметрам сборки, так и при поэлементном анализе.

Список литературы

1. Бобков В.П., Ефанов А.Д., Пометько Р.С., Смогалева И.П. Модифицированная таблица для критических тепловых потоков в сборках тепловыделяющих стержней в треугольной упаковке. Теплоэнергетика (в печати).
2. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Кириллов П.Л., Смогалева И.П. Критические тепловые потоки в треугольных пучках стержней (Скелетная таблица, версия 1997 г.) // Теплоэнергетика, 1999, N 11, с. 54-63.
3. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Ефанов А.Д., Смогалева И.П., Сергеев В.В. Обоснование и верификация модели кризиса теплообмена в пучках стержней теплогидравлического кода KORCAP // Теплоэнергетика, 2003, №3, с.
4. Critical Heat Flux in a nonuniformity heated Rod Bundles. 3/R.H.Wilson, I.S. Stanek, I.S. Gellerstedt, r.a. Lee. – ASME, WINTER Annular Meeting. 1969. P56-62.
5. Тонг Л. Кризис кипения и критический тепловой поток. Москва, Атомиздат, 1976, с.32.
6. Min Lee. A critical heat flux approach for square rod bundles using the 1995 Groeneveld CHF table and bundle data of heat transfer research facility. Nucl. Eng. Des. 197 (2000). 357-374.

7. Смолин В.Н. Модель механизма кризиса теплоотдачи при движении пароводяной смеси и методика расчета кризисных условий в трубчатых твэлах// Исследование критических тепловых потоков в пучках стержней. Семинар СЭВ ТФ-74.Б. 1974. 1974 С. 209-124.
8. Смолин В.Н., Поляков Л.Н. Критический тепловой поток при продольном обтекании пучка стержней//Теплоэнергетика. 1967. № 4. С. 54-58.
9. Осмачкин В.С. Кризис теплоотдачи при движении кипящей воды вдоль пучков тепловыделяющих стержней. Препринт ИАЭ-2014. М.,1970.
10. Осмачкин В.С, Лыцова Н.Н.О расчете критических тепловых нагрузок в пучках стержней. Препринт ИАЭ-2204. М.,1972.
11. Астахов В.И., Безруков Ю.А., Логвинов С.А. Учет аксиальной неравномерности тепловыделения при определении запасов по кризису теплообмена в реакторе типа ВВЭР. ВАНТ, Сер.: Физика и техника ядерных реакторов, вып. 5(9), 1979, с.161-168.
12. Безруков Ю.А., Астахов В.И. и др. Исследование критических тепловых потоков в пучках стержней применительно к реакторам типа ВВЭР. Сб. докладов семинара «Теплофизика-74», Москва, 1974, с.57-66.
13. Югай Т., Гашенко М.П., Чалых А.Ф. Кризис теплообмена в сборках стержней с равномерным и косинусоидальным осевым распределением тепловыделения. Вып. трудов ГНИЭИ им. Г.М.Кржижановского "Инженерные проблемы тепловых и атомных электростанций", вып.54, М., 1978, с. 43-60.
14. Дубровский И.С., Югай Т., Гашенко М.П., Чалых А.Ф. Кризис теплообмена при вынужденном течении пароводяной смеси в сборке стержней в стационарных и нестационарных режимах. Сб. докладов семинара «Теплофизика-74», Москва, 1974, с. 67-78.
15. Астахов В.И., Безруков Ю.А., Логвинов С.А., Брантов В.Г. Исследование влияния профиля тепловыделения по длине на кризис теплообмена в пучках стержней. Семинар ТФ-78, "Теплофизические исследования для обеспечения надежности и безопасности ядерных реакторов водо-водяного типа", Будапешт, 1978, т.2. с. 589-600.

Модифицированная таблица по КТП (кВт/м²) в сборках твэлов в треугольной упаковке для $d_h=9,36$, $s/d=1,4$, $L/d_h>300$.

[illegible]

200	5000	-	-	-	6518	4600	3518										
300	25	-	-	-	344	182	127	90	76	74	73	72	60	53	52	50	49
300	50	-	-	-	554	294	206	145	123	121	119	117	97	85	84	83	80
300	100	-	-	-	630	365	234	206	210	215	211	210	184	149	136	136	98
300	200	-	-	-	915	601	386	370	368	359	339	318	259	213	194	194	185
300	300	-	-	-	1416	1032	662	672	660	622	571	507	386	326	293	286	211
300	500	-	-	-	1932	1554	1035	1038	978	853	769	643	450	357	321		
300	750	-	-	-	2173	1780	1211	1188	1121	949	866	704	460	341			
300	1000	-	-	-	2378	1981	1377	1319	1245	1029	950	753					
300	1500	-	-	-	2736	2271	1613	1513	1433	1212	1066						
300	2000	-	-	-	3097	2568	1838	1723	1636	1326							
300	3000	-	-	-	3902	3210	2327	2163	1938								
300	4000	-	-	-	5203	3931	2908	2665									
300	5000	-	-	-	6708	4705	3507										
400	25	-	-	-	336	194	135	94	83	78	76	70	60	56	55	53	50
400	50	-	-	-	541	312	217	154	133	128	125	113	95	90	86	84	80
400	100	-	-	-	626	389	242	226	229	231	223	215	196	166	150	150	120
400	200	-	-	-	921	644	425	411	403	371	344	313	276	237	213	208	153
400	300	-	-	-	1447	1105	759	757	727	625	561	486	411	360	320	311	217
400	500	-	-	-	1974	1627	1144	1114	1036	861	726	566	434	356	319	308	
400	750	-	-	-	2218	2156	1310	1255	1170	951	803	619	437				
400	1000	-	-	-	2426	2068	1461	1375	1287	1023	863	659					
400	1500	-	-	-	2786	2369	1685	1659	1514	1153	937						
400	2000	-	-	-	3161	2681	1919	1919	1719	1242							
400	3000	-	-	-	4008	3339	2510	2486	2008								
400	4000	-	-	-	5311	4089	3024	2954									
400	5000	-	-	-	6863	4854	3508										
500	25	-	-	466	330	202	141	101	87	83	80	68	58	58	54	53	52
500	50	-	-	749	530	327	228	163	140	134	129	110	94	94	92	91	90
500	100	-	-	862	622	412	248	244	244	244	232	220	207	180	163	158	98
500	200	-	-	1239	929	682	460	450	437	382	347	311	291	258	231	222	145
500	300	-	-	1902	1473	1173	849	834	791	629	552	467	434	394	349	330	202
500	500	-	-	2527	2009	1689	1245	1184	1086	868	688	495	420	356	318	312	243
500	750	-	-	2766	2257	1931	1403	1317	1217	952	744	540	416	331	293		
500	1000	-	-	2950	2468	2145	1537	1426	1327	1016	782	574	397	292			
500	1500	-	-	3366	2833	2459	1756	1793	1588	1097	818						
500	2000	-	-	3812	3214	2782	1993	2095	1794								
500	3000	-	-	5078	4103	3454	2677	2783									
500	4000	-	-	7005	5410	4235	3127	3217									
500	5000	-	-	9345	7004	4990	3506										
600	25	-	-	449	325	210	148	107	93	88	84	70	63	63	62	61	54
600	50	-	-	721	524	337	240	174	150	143	135	116	102	101	98	96	95
600	100	-	-	833	621	431	266	261	259	256	238	218	211	189	168	162	137
600	200	-	-	1210	944	729	505	487	458	389	350	306	293	267	237	225	158
600	300	-	-	1874	1522	1275	947	909	824	630	547	461	437	404	357	333	192
600	500	-	-	2500	2078	1823	1383	1278	1154	873	684	485	410	359	317	310	238
600	750	-	-	2733	2318	2056	1538	1413	1258	942	735	524	402	328	290		
600	1000	-	-	2915	2519	2255	1668	1519	1337	994	767	550	379	282			
600	1500	-	-	3322	2890	2579	1888	1840	1577	1027	745						
600	2000	-	-	3773	3280	2914	2104	2130	1770	1076							
600	3000	-	-	5024	4169	3603	2732	2781	2036								
600	4000	-	-	6921	5428	4379	3199	3252									
600	5000	-	-	9218	6946	5005	3564										
700	25	-	-	432	322	215	155	113	98	92	87	74	68	69	68	66	65
700	50	-	-	693	517	346	250	183	158	149	141	121	110	112	104	108	97
700	100	-	-	804	621	448	284	276	272	264	242	215	212	197	174	165	94
700	200	-	-	1182	959	772	547	520	477	396	351	303	296	276	243	228	126
700	300	-	-	1846	1565	1366	1039	975	855	629	542	458	439	412	362	336	178
700	500	-	-	2473	2143	1945	1508	1366	1217	874	682	474	401	360	319	306	210
700	750	-	-	2704	2376	2171	1664	1500	1298	933	727	507	390	325	288	276	212
700	1000	-	-	2878	2564	2356	1791	1604	1347	971	753	530	360	274			
700	1500	-	-	3281	2941	2688	2012	1882	1567	958	678						

700	2000	-	-	3731	3340	3035	2207	2163	1748	993							
700	3000	-	-	4972	4228	3740	2782	2779	2001								
700	4000	-	-	6841	5444	4512	3266	3283									
700	5000	-	-	9097	6888	5018	3619										
800	25	-	-	416	317	221	161	119	103	96	90	77	76	75	68	67	65
800	50	-	-	668	511	356	260	193	167	156	146	125	117	121	110	113	95
800	100	-	-	779	620	465	299	291	284	273	247	213	213	204	181	171	110
800	200	-	-	1154	971	812	587	553	496	402	352	300	297	283	250	234	144
800	300	-	-	1820	1606	1452	1126	1040	885	631	537	451	441	420	369	340	170
800	500	-	-	2446	2201	2060	1626	1447	1276	877	679	465	393	361	322	304	200
800	750	-	-	2672	2427	2276	1781	1583	1335	924	719	493	375	321	283	271	203
800	1000	-	-	2847	2608	2449	1903	1687	1357	950	740	512	343	264			
800	1500	-	-	3243	2988	2789	2127	1923	1559	898	614						
800	2000	-	-	3694	3395	3149	2304	2193	1727	918							
800	3000	-	-	4922	4283	3869	2829	2778	1969								
800	4000	-	-	6765	5459	4638	3327										
800	5000	-	-	8983	6835	5028											
1000	25	-	448	387	310	232	171	130	112	103	96	84	84	83	76	74	50
1000	50	-	721	622	499	373	275	210	182	167	155	133	133	132	123	119	81
1000	100	-	819	731	619	494	328	318	306	288	255	208	216	217	190	178	88
1000	200	-	1184	1106	995	885	658	611	529	414	355	294	301	298	262	242	122
1000	300	-	1824	1775	1680	1606	1279	1156	938	631	529	443	446	435	381	348	168
1000	500	-	2437	2398	2306	2263	1840	1596	1388	883	676	447	377	366	322	302	187
1000	750	-	2662	2618	2521	2463	1997	1733	1404	911	707	468	352	316	279	262	185
1000	1000	-	2835	2787	2685	2616	2110	1836	1374	913	717	476	311	249	220	211	177
1000	1500	-	3273	3173	3073	2969	2336	1999	1544	787	501						
1000	2000	-	3926	3627	3497	3350	2482	2251	1691								
1000	3000	-	5761	4834	4381	4102	2917	2779									
1000	4000	-	8037	6633	5484	4864	3442										
1000	5000	-	10688	8783	6737	5049											
2000	25	369	344	303	259	207	153	118	104	95	89	86	87	91	81	74	38
2000	50	594	553	488	415	333	247	192	167	154	143	138	140	146	130	123	62
2000	100	667	630	575	511	433	293	283	276	263	243	220	213	196	172	158	95
2000	200	953	918	872	815	751	567	533	491	398	372	338	312	270	236	215	111
2000	300	1449	1422	1403	1366	1334	1079	996	886	639	602	549	462	396	344	311	130
2000	500	1949	1923	1906	1868	1861	1620	1403	1256	875	814	651	482	396	344	311	148
2000	750	2143	2107	2085	2041	2023	1754	1528	1278	908	811	627	445	350	300	273	152
2000	1000	2295	2248	2220	2173	2142	1850	1620	1257	916	783	576	385	282	244	221	134
2000	1500	2789	2605	2536	2481	2424	2047	1702	1348	866	573	390	248	218	184	167	122
2000	2000	3613	3153	2894	2816	2714	2131	1811	1438	841	468	294	193				
2000	3000	5570	4735	3946	3527	3297	2412	2136	1571	759	444						
2000	4000	7625	6610	5549	4473	3896	2785	2577	1700								
2000	5000	10011	8748	7415	5692	4074	3061	2847									
3000	25	340	310	278	251	215	159	126	110	105	100	99	98	97	93	89	48
3000	50	547	498	448	404	346	256	203	177	162	152	158	164	172	152	142	70
3000	100	616	570	530	494	440	306	295	290	276	263	257	239	207	181	164	100
3000	200	889	844	815	790	749	580	548	526	443	432	416	350	287	250	226	95
3000	300	1367	1329	1327	1326	1319	1091	1017	967	744	741	709	548	424	367	330	134
3000	500	1876	1856	1841	1826	1787	1614	1445	1319	1078	977	827	648	488	418	374	158
3000	750	2092	2073	2050	2027	1979	1805	1616	1396	1166	982	806	601	441	371	331	165
3000	1000	2267	2301	2261	2225	2157	1950	1708	1440	1155	941	714	510	362	304	275	162
3000	1500	2803	2740	2618	2537	2416	2124	1807	1485	1109	796	545	365	273	231	206	115
3000	2000	3685	3561	3247	3015	2763	2317	1925	1529	1051	669	415	277	195	162	141	
3000	3000	5758	5107	4405	3814	3269	2616	2141	1605	1011	630	419	276	155	129		
3000	4000	7964	7082	6068	4933	3888	2998	2474	1748	1127	819	570	369	184			
3000	5000	10534	9408	8206	6339	4360	3306	2961	1842	1303	1086	753	483				
5000	25	340	313	291	269	240	182	148	131	120	112	114	119	82	74	71	47
5000	50	546	504	467	433	387	294	240	211	194	179	183	192	134	120	116	67
5000	100	628	588	556	526	482	351	336	330	321	303	295	290	252	220	201	78
5000	200	929	881	854	829	793	630	597	588	555	512	488	458	375	325	290	134
5000	300	1431	1381	1375	1371	1361	1139	1066	1033	875	823	781	659	508	439	391	153
5000	500	1998	2005	1982	1961	1907	1738	1625	1498	1371	1195	1044	835	636	541	479	180

5000	750	2278	2288	2251	2210	2137	1984	1801	1676	1458	1277	1038	797	580	486	425	164
5000	1000	2515	2587	2524	2460	2351	2144	1939	1736	1483	1227	944	673	483	399	347	158
5000	1500	3165	3141	2970	2834	2639	2338	2047	1781	1442	1066	725	500	368	315	283	155
5000	2000	4203	4161	3770	3423	3029	2525	2137	1785	1310	858	540	366	273	231	222	111
5000	3000	6558	5925	5138	4361	3557	2805	2290	1791	1200	758	491	336	208	147	122	77
5000	4000	9003	8087	6952	5589	4190	3170	2580	1896	1270	909	655	430	226	145	111	55
5000	5000	11755	10521	9199	7090	4611	3415	3096	2042	1420	1251	879	563	234	169	105	34
6000	25	351	327	306	285	259	195	162	141	127	119	102	86	83	75	71	41
6000	50	565	526	493	460	417	315	260	227	207	192	165	139	134	121	118	74
6000	100	654	615	584	555	514	375	356	348	340	323	265	242	232	203	184	95
6000	200	974	922	893	869	833	667	629	616	593	553	467	425	373	323	289	120
6000	300	1538	1466	1447	1433	1417	1216	1139	1120	1065	980	846	768	628	540	473	153
6000	500	2199	2164	2109	2062	1987	1842	1679	1613	1471	1327	1126	952	749	646	604	320
6000	750	2578	2510	2420	2337	2237	2052	1889	1730	1570	1367	1138	897	673	566	511	274
6000	1000	2898	2877	2746	2613	2442	2223	2000	1807	1604	1327	1027	748	535	439	377	174
6000	1500	3697	3537	3273	3030	2733	2370	2114	1887	1548	1167	796	542	395	334	344	171
6000	2000	4913	4678	4181	3690	3084	2524	2135	1829	1406	913	566	390	287	241	242	154
6000	3000	7339	6467	5593	4632	3576	2689	2177	1757	1210	758	487	336	219	160	123	103
6000	4000	9554	8407	7188	5692	4076	2890	2317	1765	1206	862	608	408	229	153	115	74
6000	5000	11669	10409	8945	6708	4305	2716	2504	1880	1264	1215	812	507	229	166	103	38
8000	25	415	389	366	346	321	218	185	168	158	149	128	111	107	95	87	41
8000	50	666	625	589	558	517	352	296	271	254	240	208	178	172	152	144	76
8000	100	772	726	690	662	622	456	422	411	404	392	321	280	283	245	221	82
8000	200	1159	1085	1040	1013	973	794	718	700	683	655	531	466	435	376	331	99
8000	300	1838	1717	1659	1635	1605	1425	1267	1232	1202	1142	919	808	707	607	529	148
8000	500	2645	2508	2395	2305	2224	2030	1868	1706	1575	1355	1125	942	764	671	680	394
8000	750	3110	2916	2752	2609	2457	2283	2018	1818	1600	1340	1086	862	656	560	544	442
8000	1000	3493	3351	3124	2892	2649	2351	2077	1836	1544	1251	941	684	483	395	359	216
8000	1500	4432	4100	3718	3335	2870	2457	2108	1809	1476	1058	707	467	319	253	169	297
8000	2000	5748	5316	4706	4017	3229	2526	2105	1753	1302	835	500	327	223	178	134	123
8000	3000	8074	7004	6065	4956	3639	2644	2071	1622	1140	676	421	285	186	137	108	100
8000	4000	9753	8494	7310	5772	4036	2700	2037	1566	1059	721	497	335	201	139	106	72
8000	5000	10797	9690	8409	6405	4238	2259	1808	1513	1016	842	593	372	195	143	91	38
10000	25	503	475	450	428	402	285	237	213	198	189	168	146	138	120	109	47
10000	50	808	764	722	686	646	459	381	342	319	305	271	237	222	195	179	76
10000	100	934	883	835	799	760	576	522	501	487	483	405	339	321	279	248	82
10000	200	1395	1311	1235	1187	1156	966	841	831	792	743	573	454	426	368	327	88
10000	300	2207	2061	1936	1870	1858	1686	1420	1437	1353	1212	856	640	595	512	449	140
10000	500	3159	2920	2738	2590	2427	2234	1924	1787	1556	1281	971	762	614	536	484	205
10000	750	3691	3366	3118	2883	2668	2375	2106	1811	1516	1164	882	671	503	431	386	192
10000	1000	4128	3840	3510	3161	2792	2456	2085	1744	1386	1001	724	512	361	297	260	123
10000	1500	5138	4638	4131	3579	2995	2444	2033	1648	1217	814	534	357	235	189	150	110
10000	2000	6473	5846	5124	4285	3277	2541	1985	1538	1073	642	398	260	173	137	115	97
10000	3000	8536	7315	6355	5111	3674	2591	1940	1418	939	556	350	244	160	122	103	80
10000	4000	9604	8252	7175	5691	3893	2575	1822	1354	916	589	416	282	176	126	92	57
10000	5000	9564	8616	7649	6038	3640	2065	1332	1320	981	670	525	325	173	128	83	38
12000	25	588	559	532	507	481	364	295	260	241	233	210	188	172	150	133	42
12000	50	942	898	856	814	772	585	475	419	387	377	338	302	276	242	216	77
12000	100	1081	1033	982	932	886	705	620	584	569	576	493	372	324	281	250	80
12000	200	1595	1514	1431	1358	1299	1096	988	950	896	802	620	480	402	347	309	104
12000	300	2499	2358	2216	2101	2022	1799	1653	1618	1486	1186	815	655	516	446	397	223
12000	500	3505	3219	3005	2789	2548	2207	1948	1694	1479	1134	825	612	461	395	296	207
12000	750	4036	3639	3343	3011	2645	2321	1926	1657	1319	969	685	495	354	299	243	142
12000	1000	4459	4093	3690	3235	2737	2303	1925	1549	1150	766	524	370	258	216	180	137
12000	1500	5543	4885	4275	3599	2889	2347	1868	1423	978	591	391	269	189	155	148	133
12000	2000	6789	5987	5206	4195	3223	2444	1893	1348	864	493	312	227	156	128	117	101
12000	3000	8389	7120	6146	4908	3517	2567	1855	1281	788	461	311	219	149	118	101	83
12000	4000	8736	7451	6515	5221	3635	2504	1750	1216	802	506	358	252	162	120	92	63
12000	5000	7687	6964	6321	5276	3213	1969	1225	1105	839	484	393	295	168	124	81	37
14000	25	647	623	601	576	552	439	353	304	271	253	233	213	179	157	139	42
14000	50	1039	1001	964	925	887	705	568	490	436	406	375	343	290	253	227	78
14000	100	1176	1136	1097	1050	1005	825	706	645	586	545	437	352	290	252	226	84

14000	200	1690	1631	1573	1504	1441	1253	1089	993	812	701	539	432	342	297	267	101
14000	300	2581	2492	2402	2290	2198	2015	1771	1612	1198	951	695	554	413	359	327	152
14000	500	3439	3240	3069	2840	2536	2223	1853	1600	1272	975	691	502	366	315	262	179
14000	750	3867	3577	3316	2975	2510	2113	1781	1431	1143	815	573	390	282	239	224	163
14000	1000	4190	3957	3607	3084	2541	2086	1698	1336	974	633	417	295	212	183	173	135
14000	1500	5384	4686	4087	3366	2639	2125	1686	1258	841	493	314	228	169	146	144	139
14000	2000	6453	5596	4795	3830	2900	2298	1771	1259	800	443	287	204	150	125	117	120
14000	3000	7550	6328	5454	4252	3166	2406	1828	1256	786	480	308	217	147	116	102	92
14000	4000	7084	6131	5386	4360	3185	2393	1763	1228	819	539	368	246	156	115	89	66
14000	5000	5339	4781	4523	4040	2680	2027	1405	1046	790	574	364	256	152	114	77	40
16000	25	654	633	614	592	572	489	394	335	273	237	209	175	133	118	109	43
16000	50	1051	1017	985	951	919	783	632	539	438	381	335	282	217	191	174	79
16000	100	1174	1137	1103	1064	1025	898	767	688	561	495	376	307	237	208	188	86
16000	200	1644	1580	1530	1476	1414	1284	1145	1020	803	639	462	369	298	259	236	103
16000	300	2455	2344	2264	2184	2081	1953	1810	1603	1225	879	596	465	393	343	316	137
16000	500	3178	2868	2714	2527	2255	1950	1694	1400	1128	854	601	433	334	295	264	161
16000	750	3460	3075	2864	2566	2172	1817	1493	1224	964	714	488	341	250	222	219	194
16000	1000	3652	3351	3053	2672	2145	1764	1440	1108	833	549	360	247	187	166	162	159
16000	1500	4455	3910	3456	2852	2287	1834	1473	1098	760	437	267	192	147	131	140	131
16000	2000	5018	4583	4015	3223	2533	2044	1639	1208	786	455	268	190	137	119	114	122
16000	3000	6024	5140	4450	3544	2738	2211	1754	1277	862	522	347	233	152	117	106	94
16000	4000	5835	4900	4322	3557	2705	2198	1742	1296	890	617	415	277	165	115	86	67
16000	5000	4467	3805	3717	3417	2199	1909	1498	1163	861	627	407	259	133	102	71	41
18000	25	573	556	538	522	505	446	358	302	255	237	206	165	132	117	107	44
18000	50	920	892	864	838	811	718	575	486	411	382	333	266	214	189	173	81
18000	100	989	956	926	894	859	766	623	542	465	445	363	293	253	221	200	101
18000	200	1283	1221	1171	1120	1055	947	807	708	602	539	428	343	304	265	241	126
18000	300	1771	1663	1576	1491	1373	1240	1117	988	836	692	526	420	385	335	309	158
18000	500	1937	1941	1844	1735	1555	1369	1181	1029	869	690	505	375	306	276	254	165
18000	750	2102	2035	1901	1741	1503	1273	1108	935	781	599	411	288	221	199	200	174
18000	1000	2217	2215	2040	1796	1513	1253	1057	882	695	479	310	211	159	142	147	132
18000	1500	2941	2693	2387	2039	1652	1371	1161	916	673	424	249	168	142	129	131	124
18000	2000	3548	3216	2834	2342	1907	1585	1333	1055	769	457	280	189	150	125	121	115
18000	3000	4450	3624	3134	2566	2061	1719	1445	1155	834	567	381	264	161	118	108	99
18000	4000	4316	3474	3036	2510	2032	1732	1482	1179	887	628	461	328	182	112	92	71
18000	5000	3349	2851	2607	2222	1672	1573	1349	1159	898	634	485	365	152	106	76	43
20000	25	445	438	431	422	393	346	306	285	224	178	148	126	103	90	85	45
20000	50	716	702	694	678	632	556	492	459	360	286	237	204	167	149	142	83
20000	100	796	785	782	766	691	596	518	496	381	289	244	233	215	190	176	90
20000	200	951	933	929	915	824	707	581	538	447	341	279	271	256	225	210	150
20000	300	1207	1176	938	911	842	728	611	601	555	423	335	332	323	285	265	167
20000	500	1160	1192	941	914	859	735	625	605	571	472	314	266	246	221	220	196
20000	750	1146	1054	972	908	819	699	623	623	549	419	279	209	178	162	160	159
20000	1000	1196	1087	978	885	767	653	608	624	518	363	243	153	121	117	111	102
20000	1500	1631	1478	1327	1176	962	818	836	669	538	396	204	135	110	105	100	98
20000	2000	1946	1714	1508	1309	1051	878	834	760	651	382	207	136	110	99	96	93
20000	3000	2016	1732	1551	1306	1014	835	721	748	683	499	348	237	111	96	95	90
20000	4000	1854	1678	1503	1267	1016	906	934	790	676	545	412	328	144	115	91	60
20000	5000	1995	1880	1650	1370	1164	1067	1008	893	802	584	452	372	160	119	80	37