

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ВК-300 НА МОДЕЛИ ОДИНОЧНОЙ ТЯГОВОЙ ТРУБЫ

**Н.П. Сердунь, А.А., В.И. Игнатенко, Г.С. Котиков**

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ.*

*249040, г. Обнинск Калужской обл., Студгородок, 1.*



Представлены экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик реактора ВК-300 на модели одиночной тяговой трубы при давлении 3,4 МПа, различных расходах и относительных энтальпиях на входе в модель от  $-0,05$  до  $0,2$ .

Методика проведения экспериментов включает в себя создание циркуляции пароводяной смеси заданного расхода и относительной энтальпии через рабочий участок при давлении 3,3 – 3,4 МПа; измерение теплогидравлических параметров на характерных, представляющих практический интерес, подъемных и опускных участках контура.

Подтверждены конструктивные решения, обеспечивающие работоспособность реакторной установки, и представления о теплогидравлических характеристиках контура естественной циркуляции, используемых при ее расчетах. Показано, что во всем исследованном диапазоне значений относительной энтальпии существуют дисперсно-кольцевой либо кольцевой режимы течения пароводяной смеси в тяговой трубе, обеспечивающие существенную сепарацию ( $K_{\text{сеп}} = 0,4$ ) пароводяной смеси на кромке тяговых труб и в разделительной камере. Перфорация в верхней части тяговых труб позволяет увеличить коэффициент сепарации на первой ступени и создает более благоприятные условия сепарации на второй ступени.

Измеренные значения истинного объемного паросодержания в смесительной камере и тяговой трубе удовлетворительно согласуются с расчетами по методике З.Л. Миропольского и коду RELAP и могут использоваться для верификации кодов расчета теплогидравлических характеристик ВК-300. Показана возможность попадания пара в кольцевую щель, моделирующую межтрубное пространство, и его проникновение на вход активной зоны. Необходимы дополнительные исследования этого эффекта для его гарантированного исключения и разработки противоаварийных процедур.

**Ключевые слова:** ядерный реактор, естественная циркуляция, сепарация пароводяной смеси, структура пароводяной смеси, истинное объемное паросодержание.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

ВК-300 является более мощным вариантом реактора ВК-50 и представляет интерес для строительства районных АТЭЦ как источник тепловой и электрической энергии. Это корпусной кипящий реактор с интегральной компоновкой оборудования, внутрикорпус-

© Н.П. Сердунь, А.А., В.И. Игнатенко, Г.С. Котиков, 2015

ной сепарацией пара и одноконтурной схемой. Контур включает в себя активную зону (АЗ), тяговые трубы, сепарационные устройства. Подъемная часть контура состоит из активной зоны и тягового участка. В АЗ вода частично испаряется и через выходную решетку поступает в смесительную камеру, предназначенную для выравнивания паросодержания в ее объеме, поступающего из тепловыделяющих сборок с различным тепловыделением. Пройдя тяговый участок, смесь поступает в разделительную камеру, которая является первой ступенью раздела фаз. Часть потока поднимается в сепарационные устройства, где происходит основной процесс разделения фаз на насыщенный пар с влажностью до 0,1% по массе и воду с небольшим содержанием пара. Вторая часть потока – вода из разделительной камеры – поступает в опускную часть контура естественной циркуляции, где смешивается с водой, отсепарированной на сепарационных устройствах, и питательной водой.

Конструктором реактора заложен коэффициент сепарации на первой ступени  $K = 0,3$ . Это обусловлено тем, что на второй ступени сепарации  $K$  не должен превышать 0,6 – 0,7. Вихревые центробежные сепараторы могут обеспечить и более высокий коэффициент сепарации, но это требует соответствующих потерь напора, величина которых не может быть обеспечена движущим напором естественной циркуляции. Однако  $K = 0,3$  на срезе трубы и разделительной камере может быть обеспечен только при дисперсно-кольцевом или кольцевом режимах течения двухфазной смеси, а такие режимы могут быть достигнуты при относительной энтальпии более 0,19. Подтвердить или опровергнуть возможность сепарации пароводяной смеси с таким  $K$  в данных геометрических и теплогидравлических условиях является первой задачей этой работы.

Вода, отсепарированная на первой ступени, может захватывать пар и доставлять его вплоть до активной зоны, оказывая влияние на ее теплогидравлические и нейтронно-физические характеристики. Проверка этой возможности является второй задачей работы.

### **МОДЕЛЬ РЕАКТОРА. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА. ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для исследования теплогидравлических параметров использовалась одиночная тяговая труба в качестве модели реактора [1]. Размеры рабочего участка выбраны по эквивалентным проходным сечениям тяговых труб, смесительной и разделительной камер, приходящихся на одну тяговую трубу. В первом приближении коэффициент объемно-мощностного моделирования, равный отношению площадей проходного сечения перечисленных элементов контура природы и модели, равнялся единице. Выбор такой модели обусловлен следующими соображениями. Тяговый участок реактора – это система тяговых труб, в которых протекают идентичные теплогидравлические процессы. Поэтому значения теплогидравлических параметров, полученные на одной трубе, могут быть распространены на остальные, а теплогидравлическую разверку различных тяговых труб можно учесть, проведя измерения при различных значениях относительной энтальпии и расхода.

Высота природы и модели от выходной решетки АЗ до входа в осевые сепараторы (до погружного листа) также одинаковы.

Мощность, необходимая для получения номинального расхода пароводяной смеси на одну тяговую трубу  $G = 80$  т/ч при значении относительной энтальпии до  $X = 0,2$ , составляет примерно 30 МВт. Электрообогреваемых стендов такой мощности в распоряжении авторов не было, поэтому было принято решение использовать в качестве энергоисточника теплоэлектроцентраль, а пароводяную смесь нужного состава и расхода подготавливать в объемном смесителе из питательной воды котлов и перегретого пара из барабан-сепараторов.

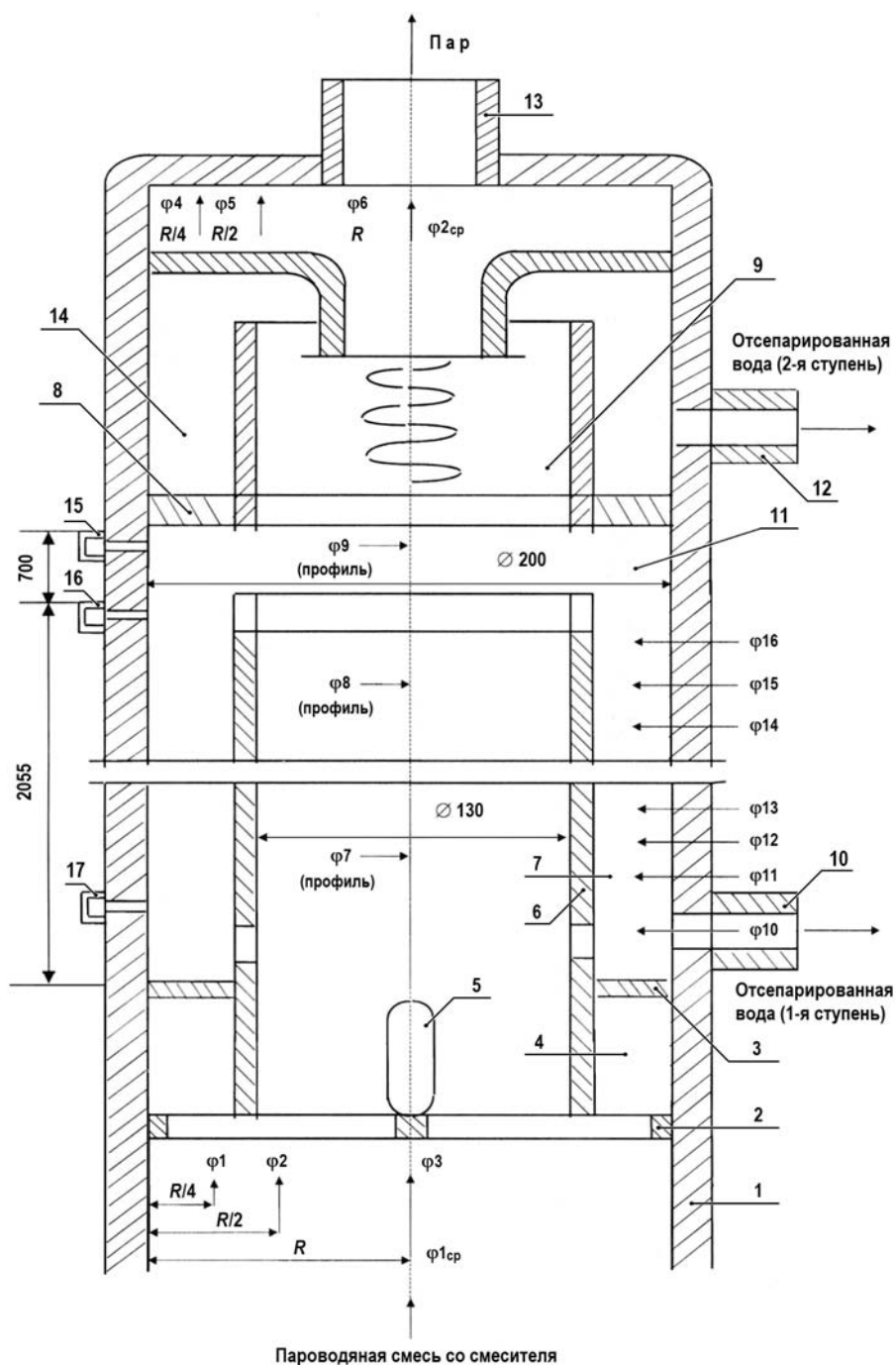


Рис. 1. Схема модели одиночной тяговой трубы и расположения измерительных датчиков (обозначения указаны в тексте)

Из конструктивных соображений для изготовления корпуса рабочего участка использовалась труба  $\varnothing 219 \times 10$  мм, что при диаметре модели тяговой трубы  $\varnothing 136 \times 3$  мм обеспечивало коэффициент объемно-мощностного моделирования  $K_{\text{мод}} = 2,37$  для всех элементов контура циркуляции. Диаметр модели тяговой трубы был уменьшен с 200 до 130 мм, а ширина кольцевой щели, моделирующей долю проходного сечения, приходящего-

ся на одну тяговую трубу ЯЭУ, составила примерно 31 мм. Предполагается, что уменьшение диаметра тяговой трубы до 130 мм не повлияет на структуру потока. Для соответствия натуры и модели по теплогидравлическим характеристикам ( $\Delta P$ ,  $\phi$  и др.) должно соблюдаться условие  $K_{\text{мод}} = G_{\text{нат}}/G_{\text{мод}} = 2,37$  по всем элементам контура естественной циркуляции.

Конструкция рабочего участка показана на рис. 1. Основу рабочего участка составляет корпус 1, выполненный из трубы  $\varnothing 219 \times 10$  мм, внутри которой расположены все конструктивные элементы. Теплоноситель (вода или пароводяная смесь) от смесителя через выходную решетку 2 поступает в смесительную камеру 4, ограниченную сверху глухим листом 3. На выходную решетку опирается тяговая труба 6. В выходной решетке выполнены три отверстия, поэтому часть теплоносителя попадает непосредственно внутрь тяговой трубы, а часть – в межтрубное пространство смесительной камеры 4, далее внутрь тяговой трубы через окна 5 в ее боковой поверхности. Этот узел полностью моделирует конструкцию натурального выходного участка. Длина тяговой трубы – 2,054 м. Пройдя тяговую трубу 6, пароводяная смесь попадает в разделительную камеру 11, частично сепарируется, и отсепарированная вода как более тяжелая фаза опускается в межтрубное пространство (кольцевую щель) 7 и через патрубок 10 уходит из рабочего участка. Оставшаяся пароводяная смесь подается в осевой сепаратор 9, пар через рассекатель поступает в паровой объем и через патрубок 13 уходит из рабочего участка. Отсепарированная вода уходит в межсепараторное пространство 14 и через патрубок 12 покидает рабочий участок. В процессе экспериментов на погружном листе 8 поддерживался уровень воды 200 – 300 мм (высота осевого сепаратора  $\approx 600$  мм.). Элементы схемы 15, 16 и 17 – камеры отбора давления для измерения перепада давления (потери напора) на соответствующих участках тракта.

Таким образом, составные элементы рабочего участка от выходной решетки активной зоны 2 до погружного листа 8 адекватны или очень близки по конструкции к натурным и по высоте равны им. В этой части рабочий участок является полнонивелирной однотрубной (по тяговому участку) моделью ВК-300. Выходная часть рабочего участка (от погружного листа 8 до патрубка 13) на данном этапе работы выполнена неадекватно натуре, поскольку это не влияет на характер теплогидравлических процессов.

Принципиальная гидравлическая схема экспериментального стенда (рис. 2) состоит из водяного контура и паровых линий.

Вода от напора циркуляционного насоса НЦ через расходомерную шайбу  $G_v$  и регулирующий вентиль  $ВР_1$  поступает на смеситель СМ. Сюда же через запорный вентиль  $ВЗ_2$  (расположен на отводе станционного парового коллектора), расходомерную шайбу  $G_n$  и регулирующий вентиль  $ВР_4$  поступает пар при давлении  $P \approx 3,2 - 3,4$  МПа и температуре 400 – 430 °С. Образовавшаяся в смесителе пароводяная смесь поступает в рабочий участок МО. Отсепарированная на тяговой трубе и в смесительной камере вода при температуре насыщения через патрубок поступает в холодильник ТО и через расходомерную шайбу  $G_{\text{сеп}}$  и регулирующий вентиль  $ВР_2$  в смесительный узел УС и далее на вход циркуляционного насоса. Отсепарированная на осевых сепараторах вода через патрубок и уровнемерный бачок БУ поступает на смесительный узел УС, смешивается с водой, отсепарированной на первой ступени, и подается на вход циркуляционного насоса. Отсепарированный пар через патрубок, регулирующий вентиль  $ВР_3$  и запорный вентиль  $ВЗ_3$  поступает либо на выброс в атмосферу, либо к потребителям ТЭЦ. Следует отметить, что водяная линия (кольцевая щель – водяной выходной патрубок – холодильник ТО и т.д. до смесительного узла) представляет собой модель опускного контура реактора по первой ступени сепарации. Вторая водяная линия (водяной патрубок – БУ и т.д. до смесительного узла) представляет собой модель опускного контура реактора по второй ступени сепарации.

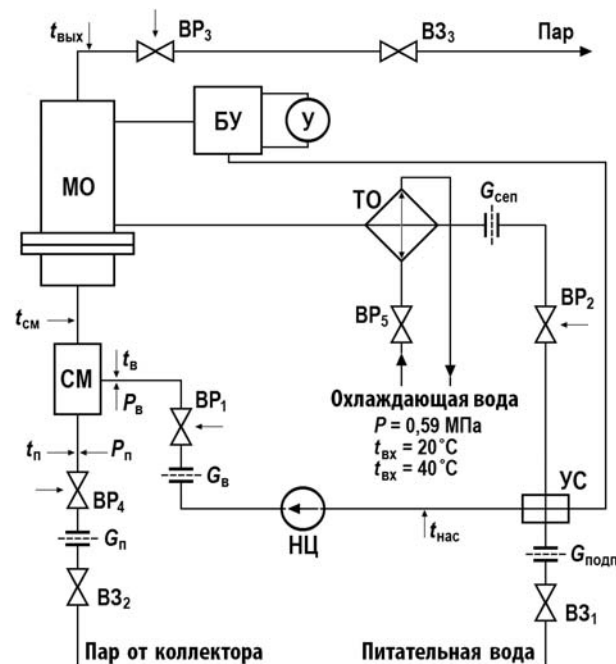


Рис. 2. Теплогидравлическая схема экспериментального стенда: МО – модель однотрубная; БУ – бакоч уровнемерный; У – уровень воды на погружном листе; ВЗ – вентиль запорный; ВР – вентиль регулирующий; НЦ – насос циркуляционный; СМ – смеситель; ТО – теплообменник; УС – узел смесительный; G – расходомер; P – манометр

Методика проведения экспериментов заключалась

- в создании циркуляции пароводяной смеси заданного расхода и относительной энтальпии через рабочий участок при давлении 3,3 – 3,4 МПа;
- в измерении теплогидравлических параметров на характерных, представляющих практический интерес, подъемных и опускных участках контура.

Измерялись режимные и экспериментальные параметры.

Режимные параметры (рис. 2):  $t_b$  – температура воды на входе в смеситель;  $G_b$  – расход воды на входе в смеситель;  $P_b$  – давление воды на входе в смеситель;  $t_n$  – температура пара на входе в смеситель;  $G_n$  – расход пара на входе в смеситель;  $P_n$  – давление пара на входе в смеситель;  $t_{см}$  – температура смеси после смесителя;  $t_{вых}$  – температура теплоносителя на паровой сбросной трубе;  $t_{нас}$  – температура на всасе циркуляционного насоса;  $P_{сеп}$  – давление на выходе из холодильника ТО;  $G_{сеп}$  – расход отсепарированной на первой ступени воды;  $G_{подп}$  – расход подпиточной воды; У – уровень воды на погружном листе.

Экспериментальные параметры (рис. 1):  $\varphi_{1cp}$  – среднее по сечению истинное объемное паросодержание на входе в тяговую трубу, измеряемое с помощью гребенки локальных зондов  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ ;  $\varphi_{2cp}$  – среднее по сечению истинное объемное паросодержание на выходе из рабочего участка, измеряемое с помощью гребенки  $\varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$ ;  $\varphi_7$  – распределение истинного объемного паросодержания по сечению нижней части тяговой трубы;  $\varphi_8$  – распределение истинного объемного паросодержания по сечению верхней части тяговой трубы;  $\varphi_9$  – распределение истинного объемного паросодержания по сечению разделительной камеры на входе в осевой сепаратор; (параметры  $\varphi_7$  –  $\varphi_9$  измерялись с помощью передвижных зондов).

Истинное объемное паросодержание по высоте кольцевой щели измерялось зондами  $\varphi_{10}$  –  $\varphi_{16}$ , рабочие элементы которых размещались на одной образующей.

Кроме того, измерялись потери давления на тяговой трубе, на кольцевой щели, на разделительной камере и на опускном участке.



Эксперименты проводились при следующих режимных параметрах. Расход пароводяной смеси на входе в рабочий участок:  $G_{\text{см}} = G_{\text{см ном}} = 35 \text{ т/ч}$ ;  $G_{\text{см}} = 0,5 G_{\text{см ном}}$ ;  $G_{\text{см}} = 1,5 G_{\text{см ном}}$ . Относительная энтальпия на входе в рабочий участок:  $X_{\text{вх}} = -0,05 - +0,2$  с шагом  $\Delta X = 0,05$ . Давление  $P = 3,3 - 3,5 \text{ МПа}$  (обусловлено рабочим давлением пара котлов ТЭЦ). Анализ литературных данных [2 – 4] позволил сделать вывод о том, что структура пароводяного потока в тяговой трубе не зависит от давления в диапазоне  $P = 3,0 - 7,0 \text{ МПа}$ . Влияние давления на другие теплогидравлические параметры при пересчете опытных данных на реальное давление будет учтено зависимостью соответствующих теплофизических свойств.

Измерения температуры и перепада давления производились по общепринятым методикам.

Расходы воды на входе в смеситель и отсепарированной на первой ступени определялись по перепаду давления на дроссельных шайбах ( $d_y = 55 \text{ мм}$  для  $G_{\text{в}}$  и  $d_y = 36 \text{ мм}$  для  $G_{\text{сеп}}$ ). Перепад давления на шайбах измерялся с помощью преобразователей «Сапфир-22ДД». Градуировочная зависимость для воды  $G = f(\Delta P)$  определялась экспериментально на специальном сертифицированном проливочном стенде. Градуировочная зависимость  $G = f(\Delta P)$  для пара рассчитывалась по нормативному методу [5]. Погрешность измерения расхода воды составила 2%, пара – 5%.

Для измерения истинного объемного паросодержания использовались кондуктометрические зонды, разработанные в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ».

Кондуктометрический метод основан на использовании различия электрических свойств воды и пара. Метод реализуется с помощью электроконтактного зонда сопротивления, представляющего собой два электрода, помещенные в конкретную точку объема исследуемой среды. К электродам приложена разность потенциалов. Паросодержание в конкретной точке объема в каждый момент времени может принимать только два значения: ноль либо единицу. Среднее за время  $\tau$  локальное истинное объемное паросодержание определяется по формуле

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \Delta \tau_i / \tau,$$

где  $\tau$  – время измерения;  $\Delta \tau_i$  – время непрерывного пребывания пара в чувствительном объеме датчика;  $n$  – количество паровых включений, прошедших через чувствительный объем датчика за время  $\tau$ .

Анализ сигналов, полученных на датчике паросодержания, и их первичная обработка осуществлялись на вторичном приборе, разработанном в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». Специальные метрологические и методические исследования показали, что относительная погрешность измерения локального истинного объемного паросодержания не превышает 12%.

Датчики температуры, перепада давления, давления и расхода заводились на электронный коммутатор Ф7078; их показания последовательно измерялись цифровым прибором Щ-300 и регистрировались на жестком диске персонального компьютера «Pentium-60», ПК-1.

Датчики паросодержания подключались к 16-канальному вторичному прибору, значения паросодержания измерялись с помощью персонального компьютера ПК-2 и регистрировались в единой таблице опытных данных на ПК-1. ПК-2 использовался также для управления вторичным прибором. Опрос датчиков, регистрация измеренных параметров и их первичная обработка проводились по специально разработанной программе. Скорость опроса для всех подпрограмм составила 5 точек/с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерения в каждом стационарном режиме, характеризуемом набором режимных параметров  $G_{\text{в}}, G_{\text{п}}, t_{\text{в}}, t_{\text{п}}, P_{\text{в}}, P_{\text{п}}$ , определяющих значения относительной энтальпии и ос-

тальных экспериментальных параметров, проводились от трех до 15-ти раз. Построение графиков и анализ полученных результатов проводились по усредненным значениям измеренных параметров. Анализ опытных данных показал, что отклонения каждого измеренного параметра в каждом измерении от его среднего значения лежат в пределах указанных выше погрешностей измерений.

Среднее по сечению истинное объемное паросодержание на входе в канал (тяговую трубу) измерялось с помощью гребенки из трех локальных датчиков паросодержания, а затем интегрировалось по площади проходного сечения канала. Следует отметить, что схема установки датчиков и, следовательно, система усреднения  $\phi$  не являются абсолютно корректными. Датчики располагались под моделью выходной решетки активной зоны, в которой имелось три отверстия, через которые пароводяная смесь подавалась в модель смесительной камеры (частично в тяговую трубу, частично в кольцевую щель). Структура такого потока далеко не симметрична, т.е. для симметричного потока применима использованная методика усреднения  $\phi$ . Для корректного измерения среднего значения  $\phi_{1cp}$  необходимо либо существенно большее количество локальных датчиков в сечении, либо использование, по крайней мере, двух передвигающихся зондов, расположенных перпендикулярно друг другу в этом сечении. К сожалению, реализовать эту идею не удалось.

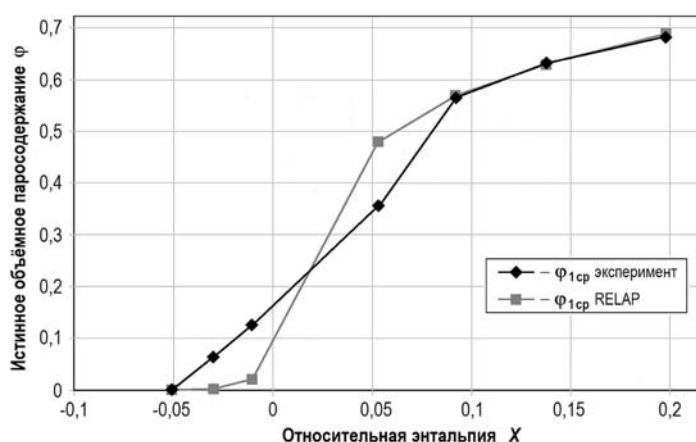


Рис. 3. Зависимость среднего по сечению истинного объемного паросодержания от относительной энтальпии на входе в рабочий участок

На рисунке 3 приводится зависимость среднего по сечению истинного объемного паросодержания  $\phi$  от относительной энтальпии  $X$  на входе в тяговую трубу. Полученные результаты позволяют сделать некоторые выводы об истинном объемном паросодержании в каналах исследуемой геометрии. На графике кроме опытных данных показана зависимость  $\phi = f(X)$ , рассчитанная по коду RELAP [6]. В области равновесного пароводяного потока ( $X \leq 0,1$ ) экспериментальные и расчетные значения истинного объемного паросодержания совпадают. В области неравновесного пароводяного потока совпадение хуже. Однако, во-первых, необходимо учесть вышеизложенные соображения о погрешности измерения  $\phi_{1cp}$ , а во-вторых, иметь в виду, что при точности определения  $X$ , равной 10 – 15%, такой разброс расчетных и экспериментальных данных может быть признан удовлетворительным.

Одним из важнейших параметров контура естественной циркуляции являются перепады давления (потери напора) на различных элементах контура. Полученные в работе результаты измерений полных перепадов давления использованы для верификации расчетных кодов TRAC, RELAP, POCA, применяемых для расчетов теплогидравлических характеристик реакторной установки ВК-300 (в данной работе не приводятся).

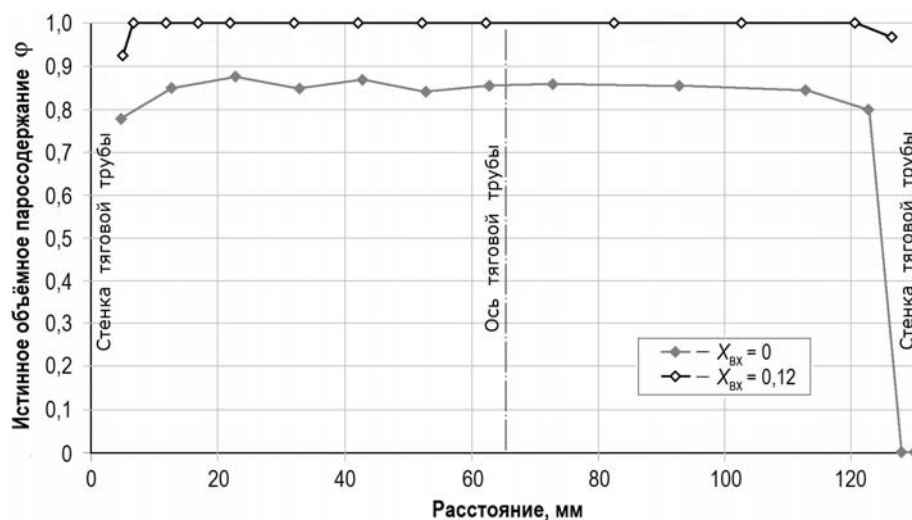


Рис. 4. Распределение истинного объемного паросодержания по сечению нижней части тяговой трубы при  $X_{вх} = 0$  и  $X_{вх} = 0,12$

На рисунке 4 показаны результаты измерений распределения истинного объемного паросодержания по сечению тяговой трубы при  $G_{см} = 10$  кг/с и относительной энтальпии на входе в тяговую трубу  $X_{вх} = 0$  и  $X_{вх} = 0,12$  соответственно.

Отметим некоторые особенности полученных результатов. Уже при значениях относительной энтальпии на выходе из смесителя (модель активной зоны), близких к нулю, наблюдается дисперсно-кольцевой режим течения пароводяной смеси в тяговой трубе. Измеренные профили истинного объемного паросодержания симметричны (в пределах погрешности измерений). При  $X = 0$  жидкая фаза течет тонкой (около 5 мм) пленкой по стенкам трубы, паровая фаза с диспергированными в ней каплями воды занимает остальное сечение тяговой трубы. При  $X = 0,12$  влага в ядре потока отсутствует. Образуется кольцевой режим течения пароводяной смеси.

Усредненные по сечению нижней части тяговой трубы при  $X = 0$  значения истинного объемного паросодержания составляют  $\phi_{7ср} = 0,72$ , а в смесительной камере —  $\phi_{1ср} = 0,2$ . Расчет по методике [7] для адиабатного пароводяного потока в предположении его неравновесности дает значение  $\phi$  в тяговой трубе, равное 0,71, а в смесительной камере — 0,53. Очевидно, совпадение опытных и расчетных данных в тяговой трубе хорошее, а неудовлетворительное в камере смешения может быть обусловлено, с одной стороны, описанной выше некорректностью усреднения измеренных значений локального паросодержания  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$ , а с другой стороны, некорректностью учета неравновесности потока при расчете  $\phi$ .

При  $X = 0,12$  в условиях равновесного пароводяного потока совпадение опытных и расчетных данных хорошее. Измеренные значения среднего истинного паросодержания в смесительной камере и тяговой трубе составляют 0,53 и 0,88, а расчетные — 0,59 и 0,81 соответственно.

Специальный эксперимент был посвящен исследованию истинного объемного паросодержания в кольцевой щели (датчики  $\phi_{10} - \phi_{16}$ ). Рабочие элементы датчиков располагались по вертикальной образующей щели (ширина щели — 30 мм). При этом датчик  $\phi_{10}$  располагался практически на выходе из кольцевой щели (см. рис. 1), датчик  $\phi_{16}$  — в 100 мм ниже среза тяговой трубы, а остальные датчики ( $\phi_{11} - \phi_{15}$ ) — на равных расстояниях друг от друга по высоте кольцевой щели.

Измерения проводились следующим образом. Устанавливался исходный режим, близкий к натурному ( $G = 9$  кг/с,  $X = 0,10$ ); ступенчатым открытием вентиля ВР<sub>2</sub> (см. рис. 2)



моделировалось уменьшение гидравлического сопротивления опускной ветви первой ступени сепарации контура естественной циркуляции.

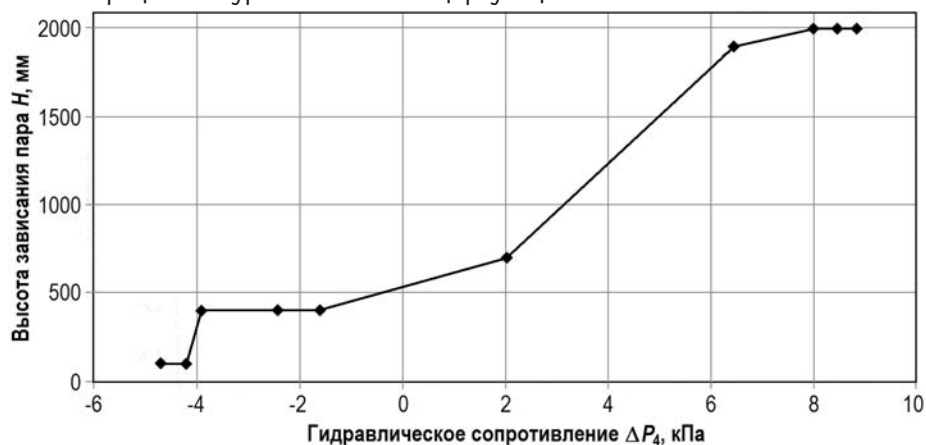


Рис. 5. Зависимость высоты зависания пара в кольцевой щели от гидравлического сопротивления тракта

Результаты измерений показаны на рис. 5 в координатах «высота зависания пара в кольцевой щели (уровень воды в кольцевой щели)  $H$ » – «полные потери напора на этом участке контура  $\Delta P_4$ ». Уровень воды в кольцевой щели определялся по измерениям истинного объемного паросодержания по ее высоте. Из рисунка следует, что в номинальных режимах по расходу и относительной энтальпии при максимально закрытом вентиле (максимальном гидравлическом сопротивлении) вся кольцевая щель заполнена водой. По мере открытия вентиля  $ВР_2$  и уменьшении гидравлического сопротивления уровень воды в кольцевой щели понижается и при полностью открытом вентиле  $ВР_2$  (минимальном гидравлическом сопротивлении тракта) становится равным нулю. Это подтверждает возможность захвата пара потоком отсепарированной в разделительной камере воды и попадания его на вход в активную зону.

Таким образом, в принципе, при неправильном выборе гидравлического сопротивления опускной ветви этой части контура возможны, с одной стороны, запирание расхода и прекращение сепарации пароводяной смеси (слишком высокое гидравлическое сопротивление тракта), а с другой стороны, заброс пара на вход в активную зону (слишком низкое гидравлическое сопротивление тракта). Конструкторам и проектировщикам реактора необходимо учитывать это обстоятельство.

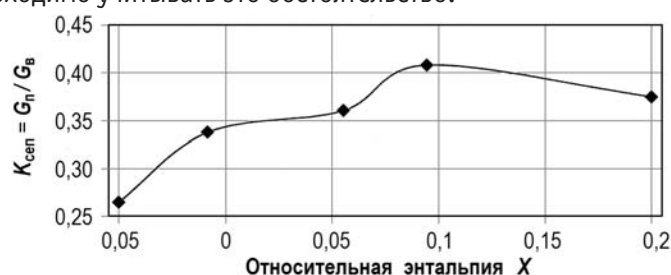


Рис. 6. Зависимость  $K_{сеп}$  пароводяной смеси на первой ступени от относительной энтальпии на входе в тяговую трубу

На рисунке 6 показана зависимость степени сепарации пароводяной смеси в смесительной камере от относительной энтальпии на входе в тяговую трубу, имеющая максимум при  $X = 0,1 - 0,11$  и номинальном расходе теплоносителя через тяговую трубу при  $K_{сеп} = 0,4$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован ряд теплогидравлических характеристик реактора ВК-300 на модели одиночной тяговой трубы для элементов контура естественной циркуляции.

Подтверждены ряд конструктивных решений, обеспечивающих работоспособность реактора, и представления о теплогидравлических характеристиках контура естественной циркуляции, используемых при расчетах реактора по различным кодам. В частности, показано, что во всем исследованном диапазоне значений относительной энтальпии существует дисперсно-кольцевой либо кольцевой режимы течения пароводяной смеси в тяговой трубе, что обеспечивает существенную сепарацию пароводяной смеси на кромке тяговых труб и в разделительной камере ( $K_{\text{сеп}} = 0,4$ ). Этого вполне достаточно для достижения необходимой сепарации на осевых сепараторах (вторая ступень) в пределах движущего напора естественной циркуляции. Для увеличения коэффициента сепарации на тяговых трубах при такой структуре потока представляется целесообразным выполнить перфорацию в верхней части тяговых труб. Это увеличит коэффициент сепарации на первой ступени сепарации и создаст более благоприятные условия сепарации на второй ступени.

Измеренные значения истинного объемного паросодержания в смесительной камере и тяговой трубе удовлетворительно согласуются с рассчитанными по методике [7] и коду RELAP [6]. Они могут использоваться для верификации кодов, применяемых для расчета теплогидравлических характеристик реакторной установки ВК-300.

Показано, что возможно попадание пара в кольцевую щель, моделирующую межтрубное пространство, и его проникновение на вход в активную зону. Высота зависания пара на этом участке контура зависит от его гидравлического сопротивления. Необходимы дополнительные исследования этого эффекта при рабочем давлении установки (70 МПа) и различных расходах, моделирующих пусковые и переходные режимы для его гарантированного исключения, а также разработка противоаварийных процедур для обеспечения безопасности реакторной установки [8].

### Литература

1. Калякин С.Г., Ремизов О.В., Сердунь Н.П., Климанова Ю.В. Структура пароводяного потока и особенности его сепарации в каналах большого диаметра. //Труды III Российской национальной конференции по тепломассообмену. Том 5. Москва, 2002 г.
2. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидравлика газо-жидкостных систем. – М.-Л.: ГЭИ, 1958, 232 с.
3. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. – М.: МИР, 1972, 440 с.
4. Хьюит Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. – М.: Энергия. 1974, 408 с.
5. ГОСТ 8.563.1-3-97. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Минск: – Изд-во стандартов. 1998, 46 с.
6. Idaho National Engineering Laboratory Lockheed Idaho Technologies Company Idaho Falls, Idaho 83415 "RELAP5/MOD3 CODE MANUAL VOLUME IV: MODELS AND CORRELATIONS".
7. Миропольский З.Л., Шнеерова Р.И., Карамышева А.И. Паросодержание при напорном движении пароводяной смеси с подводом тепла и в адиабатических условиях. //Теплоэнергетика, 1971. -№5. -С.46-51.
8. Шкаровский А.Н., Аксенов В.И., Колеватых А.П., Сердунь Н.П., Росляков А.А. Расчетно-техническое обоснование противоаварийных процедур АЭС с ВВЭР-1000. // Известия вузов. Ядерная энергетика.-2007.-№3.-С.54-64.

Поступила в редакцию 25.04.2015 г.

### Авторы

Сердунь Николай Павлович, доцент, кандидат техн. наук  
E-mail:snp@iate.obninsk.ru

Игнатенко Валерий Иванович, старший преподаватель  
E-mail:snp@iate.obninsk.ru

Котилов Геннадий Сергеевич, старший преподаватель  
E-mail:snp@iate.obninsk.ru

## EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL AND HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF VK-300 REACTOR IN SOLITARY UPTAKE TUBE MODEL

Serdun' N.P., Ignatenko V.I., Kotikov G.S.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of the National Nuclear Research University «МЭФИ».

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

### ABSTRACT

Reactor VK-300 is more powerful than VK-50 and it is interesting for building regional nuclear heat and energy plant. VK-300 is boiling water reactor with integrated concept of equipment, in-vessel steam separation, single-loop steam cycle.

This article is concerned with realization of experimental works of thermohydraulic reactor characterization on the model of single draft tube under pressure 3.4 MPa, different discharge and relative enthalpy on the entry of the model from  $-0.05$  to  $0.2$ .

The routine of experiment is: a) creation of circulation of water-steam mixture with target discharge and relative enthalpy through the working unit under pressure  $3.3 - 3.4$  MPa; b) detection of thermohydraulic parameters of riser and down comer circuits which interesting for practice.

Executed experimental work confirmed the project design which provide the functional ability of reactor and thermohydraulic characteristics of natural circulation loop for reactors calculations with different codes. It is shown that in all range studied of the value of relative enthalpy there are annular-dispersed or droplet-dispersed flow of water-steam mixture in draft tube. It provides the significant separation on the axial separators (the second stage of separation) in the range of moving fall of natural circulation. For the increase of the coefficient in draft tubes in this structure of flow it makes most sense to do the perforation in the top of the draft tube. It will increase the coefficient of separation on the first stage of separation and create more favorable conditions for separation on the second stage.

Measured values of the steam volume fraction in the mixing chamber and the draft tube are in satisfactory agreement with values calculated by the Z.L. Miropol'skij method and code RELAP and can be used for verification accounting code, which used for calculation of thermohydraulic characterizations of VK-300.

It has been shown that it is possible ingress of steam into the ring slit, modeling inter tubular space and its penetration into the nuclear reactor core inlet. The cushion height of steam on this segment depends from its hydraulic resistance. It should be further study of this effect at the operating pressure of units ( $70$  MPa) and various discharge simulating starting and transient modes, for its guaranteed exclusion, as well as the development of emergency response procedures to ensure the safety of the reactor.

**Key words:** Nuclear reactor, natural circulation, separation of steam-water mixture, steam-water flow pattern, steam volume fraction

### REFERENCES

1. Kalyakin S.G., Remizov O.V., Klimanova Yu.V. Struktura parovodyanogo potoka i osobennosti ego separacii v kanalax bol'shogo diametra. Trudy III Rossiyskoj natsionalnoy konferencii po teplomassoobmenu. Tom 5. Moskva. 2002 (in Russian).
2. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. Gidravlika gazo-zhidkostnyx sistem. Moscow-Leningrad, GEI Publ., 1958. 232 p. (in Russian).
3. Uolis G. Odnomernye dvuhfaznye techeniya. Moscow, Mir Publ., 1972. 440 p. (in Russian).

4. Hiyit G., Xoll-Teilor H. Kol'cevyte dvuhfaznye techeniya. Moscow, Energiya Publ., 1974. 408 p. (in Russian).
5. GOST 8.563.1-3-97. Izmerenie rashoda i kolichestva zhidkостей i gazov metodom peremennogo perepada davleniya. Minsk, Izdatel'stvo standartov Publ., 1998. 46 p. (in Russian).
6. Idaho National Engineering Laboratory Lockheed Idaho Technologies Company Idaho Falls, Idaho 83415 "RELAP5/MOD3 CODE MANUAL VOLUME IV: MODELS AND CORRELATIONS".
7. Miropolyskiy Z.L., Shneerova R.I., Karamysheva A.I. Parosoderzhanie pri napornom dvizhenii parovodiyanoj smesi s podvodom tepla i v adiabaticheskikh usloviyah. *Teploenergetika*. 1971, no. 5, pp. 46-51 (in Russian).
8. Shkarovskiy A.N., Aksyonov V.I., Kolevatyh A.P., Serdun' N.P., Rosliyakov A.A. Raschyotno-tehnicheskoe obosnovanie protivooavarijnyh procedur AES s VVER-1000. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2007, no. 3, pp. 54-64 (in Russian).

### Authors

Serdun' Nikolaj Pavlovich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [snp@iate.obninsk.ru](mailto:snp@iate.obninsk.ru)

Ignatenko Valerij Ivanovich, Senior Lecturer

E-mail: [snp@iate.obninsk.ru](mailto:snp@iate.obninsk.ru)

Kotikov Gennadij Sergeevich, Senior Lecturer

E-mail: [snp@iate.obninsk.ru](mailto:snp@iate.obninsk.ru)