

---

---

# ТЕХНОЛОГІЇ TECHNIQUE

---

---

УДК 536.24

Е. А. АРХИПОВА

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ

Н. АРХИПОВА

## MODELLING OF HEAT TRANSFER AND HYDRODYNAMICS OF THE TURBULENT FLOW OF SUPERCRITICAL PARAMETERS IN ANNULAR CHANNELS

---

**Аннотация.** Проведено моделирование теплообмена и гидродинамики турбулентного течения сверхкритических параметров в кольцевом канале. В качестве теплоносителя выбрана вода до- и сверхкритических параметров. Основные параметры воды на входе:  $u_0 = 0,5$  м/с,  $T_0 = 290^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 25$  МПа. Численное исследование процессов гидродинамики и теплообмена в кольцевом канале проводилось на основе k-ε RNG модели турбулентности. Получены теплофизические и гидродинамические характеристики потока: распределение профилей скорости и температуры в поперечных сечениях кольцевого канала, средние значения плотности теплоносителя по длине канала и зависимости коэффициента теплоотдачи на внутренней стенке кольцевого канала.

**Ключевые слова:** моделирование, процессы гидродинамики и теплообмена, кольцевой канал, k-ε RNG модель турбулентности, характеристики потока.

**Анотация.** Проведено моделювання теплообміну та гідродинаміки турбулентної течії надкритичних параметрів в кільцевому каналі. Як теплоносії вибрана вода до- та надкритичних параметрів. Основні параметри води на вході:  $u_0 = 0,5$  м/с,  $T_0 = 290^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 25$  МПа. Чисельне дослідження процесів гідродинаміки і теплообміну в кільцевому каналі проводилось на основі k-ε RNG моделі турбулентності. Отримані теплофізичні та гідродинамічні характеристики потоку: розподілення профілів швидкості та температури в поперечних перетинах кільцевого каналу, середні значення густини теплоносія по довжині каналу та залежності коефіцієнта тепловіддачі на внутрішній стінці кільцевого каналу.

**Ключові слова:** моделювання, процеси гідродинаміки і теплообміну, кільцевий канал, k-ε RNG модель турбулентності, характеристики потоку.

**Annotation.** The simulation of heat transfer and hydrodynamics of the turbulent flow of supercritical parameters in the annular channel is carried out. As the heat-carrier water to- and supercritical parameters is chosen. The main parameters of water inlet  $u_0 = 0,5$  m/s,  $T_0 = 290^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 25\text{MPa}$ . Numerical study of the processes of hydrodynamics and heat transfer in the annular channel was based on the k-ε RNG turbulence model. Thermophysical and hydrodynamic descriptions of stream are got: distribution of profiles of speed and temperature in cross-section sections of the annular channel, average values of density of the heat-carrier on length of the channel and dependence of coefficient of heat transfer on an internal wall of the annular channel.

**Key words:** simulation, processes of hydrodynamics and heat transfer, annular channe, k-ε RNG turbulence model, descriptions of stream.

---

**Введение**

В последнее время во многих странах ускоренным темпом ведется разработка усовершенствованной ЯЭУ с реактором типа супер-ВВЭР. Переход работы ЯЭУ на сверхкритические параметры теплоносителя является перспективным направлением развития атомной энергетики. В первую очередь достигается увеличение КПД до 40...45% вместо 33%, характерного для действующих атомных электростанций. Снижается стоимость ЯЭУ за счет уменьшения капитальных затрат и металлоемкости установки вследствие упрощения ее конструкционной схемы. Снижается на порядок расход теплоносителя через активную зону. Это связано с ростом теплоемкости при СКД и возможностью значительного подогрева теплоносителя (до 270°C) в активной зоне. Уменьшение расхода сопровождается снижением затрат энергии на прокачку теплоносителя. В табл.1 приведены сравнительные характеристики различных типов электростанций [1].

**Таблица 1**

**Сравнительные характеристики различных типов электростанций**

Характеристика	ABWR	PWR	ТЭС СКД	SCLWR-H
Система охлаждения	Одноконтурная с рециркуляцией	Двухконтурная	Одноконтурная прямоточная	Одноконтурная прямоточная
Электрическая мощность, МВт	1350	1150	1000	1000
КПД, %	34,5	34,4	41,8	44
Давление, МПа	7,2	15,5	24,1	25
Температура на входе/выходе, °C	269/286	289/325	289/538	280/508
Расход теплоносителя, т/с	14,4	16,7	0,821	1,16
Соотношение расход/мощность, кг/МВт·с	10,6	14,5	0,821	1,16

Обеспечение безопасности и надежности работы энергетических установок, уменьшение их воздействия на окружающую среду являются одними из главных задач при разработке реактора супер-ВВЭР.

**Физическая и математическая модель**

Рассматривается модельная задача при течении воды до- и сверхкритических параметров в кольцевом канале. На рис.1 показана схема исследуемой области. Данный объект рассмотрен в цилиндрической системе координат, где ось *z* направлена вдоль оси канала. Внутренний радиус  $R_1=5,35$  мм, внешний радиус  $R_2=7,45$  мм, длина  $L=4,05$  м. Такие значения радиусов кольцевого канала были выбраны из условия равенства гидравлических диаметров исследуемой модели и реального ВВЭР.

Численное исследование процессов гидродинамики и теплообмена в кольцевом канале проводилось на основе *k-ε* RNG модели турбулентности [2].

Математическая модель, описывающая режимы течения в круглом канале, формируется несколькими уравнениями: неразрывности, движения, энергии и замыкающих уравнений модели турбулентности:

$$\frac{\partial}{\partial z}(ru_z) + \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) = 0, \tag{1}$$

$$\rho \left( u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{zz}), \tag{2}$$

$$\rho \left( u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{rz}), \tag{3}$$

где  $\tau_{rz} = \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)$ ,  $\tau_{rr} = (2\mu + \mu_t) \frac{\partial u_r}{\partial r}$ ,  $\tau_{zz} = 2\mu_{eff} \frac{\partial u_z}{\partial z}$  – напряжения, которые входят в уравнения (2) и (3),  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ .

Уравнение энергии представлено следующим образом:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(pru_r c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z c_p T) = \frac{\partial}{\partial r}(rq_r) + \frac{\partial}{\partial z}(rq_z), \tag{4}$$

где  $q_r = \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}$ ,  $q_z = \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z}$  – плотность теплового потока,  $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t$ .

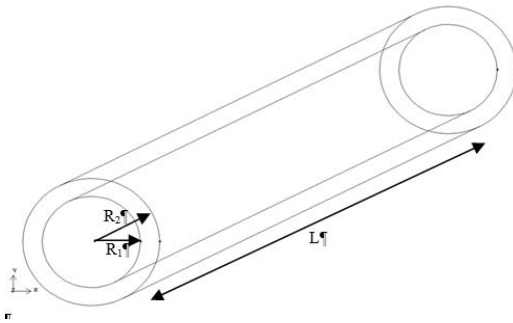


Рис. 1. Кольцевой канал

Уравнение кинетической энергии турбулентности имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u_r k) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z k) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_k - \rho \epsilon. \quad (5)$$

Последнее уравнение для замыкания математической модели – уравнение для скорости диссипации энергии:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u_r \epsilon) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z \epsilon) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + \frac{(C_1 \epsilon G_k - C_2 \rho \epsilon^2)}{k}, \quad (6)$$

где  $G_k = \mu_t \left\{ 2 \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left( \frac{u_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 \right\}$ ;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_\epsilon = 1,3$ ;  $C_1 = 1,40$ ;  $C_2 = 1,95$ .

Турбулентная вязкость  $k-\epsilon$  – модели:  $\mu = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ .

При расчете было использовано уравнение состояния по формуляции IF-97 [3]. Формуляция состоит из набора уравнений для различных областей параметров, представленных на рис.2.

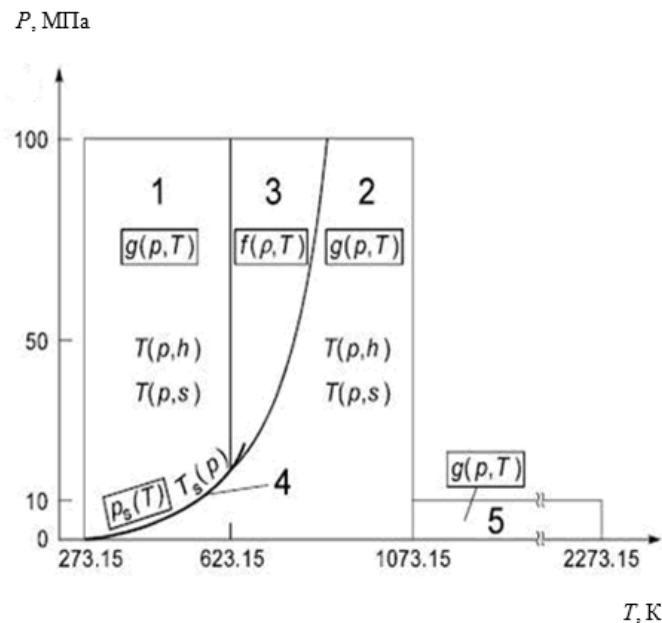


Рис.2. P,T – диаграмма областей применения уравнений формуляции IF-97

При моделировании теплоноситель проходит через область 1, 2 и 3.

В области 1 основным уравнением является уравнение для удельной энергии Гиббса [3]:

$$\frac{g(p,T)}{RT} = \gamma(\beta, \theta) = \sum_{i=1}^{34} n_i (7,1 - \beta)^{l_i} (\theta - 1,222)^{j_i}, \quad (7)$$

где  $\beta = p / p^*$  и  $\theta = T^* / T$ ;  $p^* = 16,53$  МПа,  $T^* = 1386$  К

В области 2 основным уравнением является уравнение для удельной энергии Гиббса, разделенное на две части: идеально-газовую часть  $\gamma^0$  и реальную часть  $\gamma^r$  [3]:

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\beta, \theta) = \gamma^0(\beta, \theta) + \gamma^r(\beta, \theta), \quad (8)$$

$$\gamma^0 = \ln \beta + \sum_{i=1}^9 n_i \theta^{J_i^0}, \quad (9)$$

$$\gamma^r = \sum_{i=1}^{43} n_i \beta^{J_i} (\theta - 0,5)^{J_i}, \quad (10)$$

где  $\beta = p / p^*$  и  $\theta = T^* / T$ ;  $p^* = 1$  МПа,  $T^* = 540$  К.

Для области 3 основным уравнением является уравнение для удельной энергии Гельмгольца:

$$\frac{f(p, T)}{RT} = \Phi(\delta, \theta) = n_i \ln \delta + \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{J_i} \theta^{J_i}, \quad (11)$$

где  $\delta = \rho / \rho^*$  и  $\theta = T^* / T$ ;  $\rho^* = \rho_{кр}$ ,  $T^* = T_{кр}$ .

Значения коэффициентов и показателей степени для уравнений (9), (10) и (11) приведены в [3].

Приведенная изобарная теплоемкость рассчитывается отдельно для трех подобластей [4].  
Динамическая вязкость и теплопроводность определяются из уравнений [4].

Расчетным методом для данной задачи был выбран метод контрольного объема [5].

Для численного решения задачи необходимо задать граничные условия.

На входе в канал условия имеют следующий вид:

$$u_z = u_0 = 0,5 \text{ м/с}, u_r = 0, T = T_0 = 290^\circ\text{C}, p = p_0 = 25 \text{ МПа}, Tu = 5\% \text{ при } z=0,$$

где  $Tu = \frac{1}{u_0} \sqrt{k}, k = \frac{u_r^2 + u_z^2}{2}.$

На внешней стенке кольцевого канала задавался нулевой тепловой поток – адиабатные условия  $\frac{\partial t}{\partial r} = 0$ . На внутренней стенке кольцевого канала задавался тепловой поток  $q = q_0 = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ . Такое значение теплового потока обусловлено необходимостью получения требуемых параметров теплоносителя на выходе с канала, соответствующих параметрам потока на выходе из реактора супер-ВВЭР.

### Результаты расчета

Проведено моделирование теплообмена и гидродинамики при течении воды до- и сверхкритических параметров в кольцевом канале и получены данные для скорости, температуры, плотности, коэффициента теплоотдачи и кинетической энергии турбулентности.

На рис. 3 представлены профили распределения скорости в четырех сечениях по ширине кольцевого канала. На характер изменения формы профиля скорости влияет нарастание пограничных слоев и распределение температур (рис. 4). На всех участках, кроме входного, профиль скорости имеет перекося в сторону внутренней стенки, к которой подводится тепловой поток (максимум профиля скорости смещен в сторону внутренней стенки). Это связано с тем, что температура на внутренней поверхности стенки выше, чем температура внешней стенки, и поток возле этой стенки ускоряется за счет уменьшения плотности теплоносителя в этой области. При прохождении теплоносителем расстояния 3 м от входа в канал профиль скорости более не изменяется.

На рис. 4 представлен профиль температур в четырех сечениях по ширине кольцевого канала. Как видно из этого рисунка на входе в канал наименее ощутима разница температур между теплоносителем и обогреваемой стенкой. По мере продвижения теплоносителя по каналу профиль становится более крутым. При прохождении теплоносителем расстояния 3 м от входа в канал профиль температуры более не изменяется.

На рис. 5 показано распределение средних значений плотности теплоносителя по длине кольцевого канала. Для сравнения данных, полученных при моделировании, выбраны данные работы [6] вследствие близкого значения параметров. Некоторые различия в графиках определяются конструктивными особенностями исследуемого канала по отношению к каналу работы [6]. Как видно из рис.5, значение плотности при переходе на сверхкритические параметры

уменьшается почти в 10 раз.

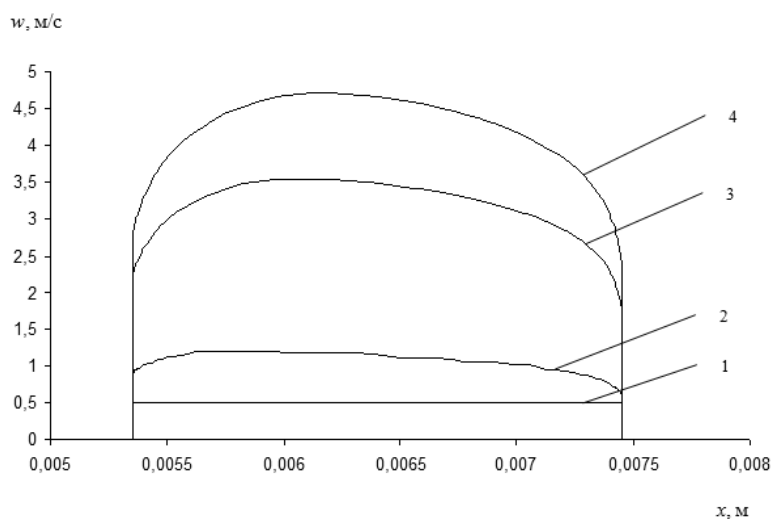


Рис.3. Распределение профилей скорости по ширине канала:

1-  $z = 0$  м; 2-  $z = 1$  м; 3-  $z = 2$  м; 4-  $z = 3$  м

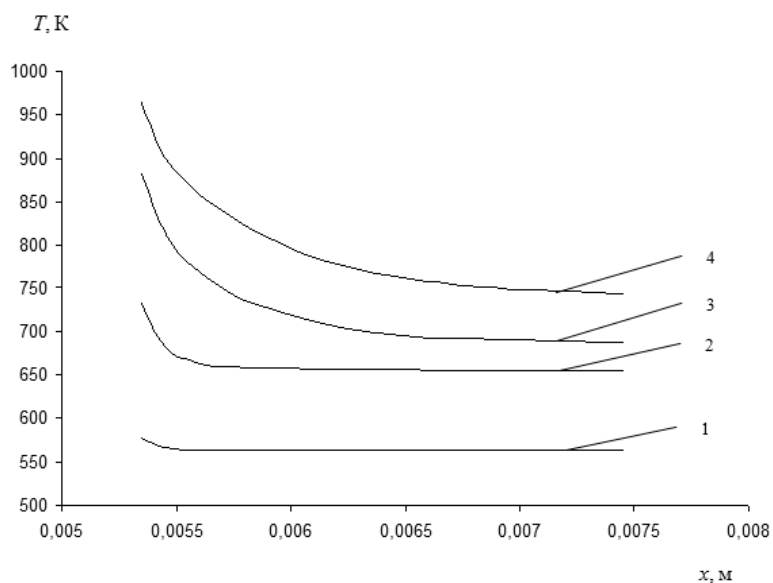


Рис. 4. Распределение профилей температуры в поперечных сечениях кольцевого канала:

1-  $z = 0$  м; 2-  $z = 1$  м; 3-  $z = 2$  м; 4-  $z = 3$  м

На рис. 6 представлены значения коэффициента теплоотдачи на внутренней стенке кольцевого канала. Значение коэффициента теплоотдачи уменьшается на участке ламинарного течения и растет при смене режима течения на турбулентный. После прохождения стабилизации теплообмена значение коэффициента теплоотдачи более не меняется.

#### Выводы

В работе проведена модификация математической модели теплообмена и гидродинамики при течении потока воды до- и сверхкритических параметров в кольцевом канале. Используя вышеуказанную математическую модель, получены данные для скорости, температуры, плотности и коэффициента теплоотдачи турбулентного потока сверхкритических параметров. Результаты демонстрируют характер изменения теплофизических и гидродинамических характеристик потока. Систематизация таких данных для каналов различной формы представляет собой необходимый этап подготовки перехода к реакторам следующего поколения, основанных на использовании воды сверхкритических параметров.

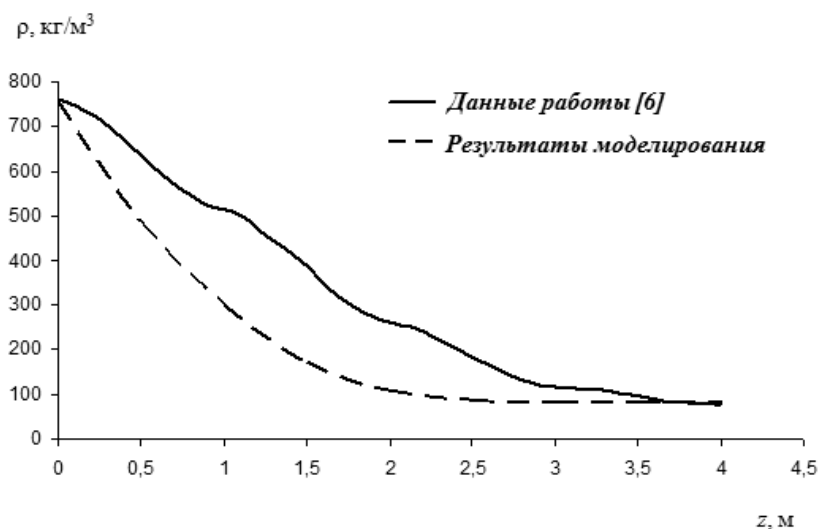


Рис.5. Распределение средних значений плотности теплоносителя по длине канала

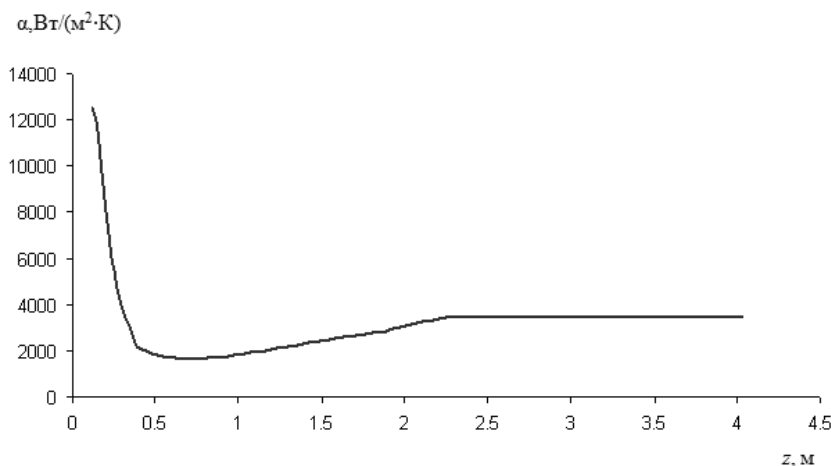


Рис.6. Зависимости коэффициента теплоотдачи на внутренней стенке кольцевого канала

**Литература**

1. Блинков В.Н., Габараев Б.А., Мелихов О.И., Соловьев С.Л. Нерешенные проблемы тепло- и массообмена водоохлаждаемых реакторных установок со сверхкритическими параметрами теплоносителя. – М: ФГУП НИКИЭТ, 2008. – 85 с.
2. Авраменко А.А., Басок Б.И., Кузнецов А.В. Групповые методы в теплофизике.– Киев.: Наукова думка, 2003. – 483 с.
3. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: справочник. – М: Издательский дом МЭИ, 2009. – 224 с.
4. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М: Издательство стандартов, 1969. – 408 с.
5. Роуч П. Вычислительная гидродинамика.– Мир Год, 1980. – 612 с.
6. Ягов П.В., Чуркин А.Н. Программа ТЕМПА-СК: Моделирование теплогидравлических процессов в активной зоне ВВЭР-СКД. – Материалы международного семинара «Вода и пар сверхкритических параметров в атомной энергетике: проблемы и решения». – М: ФГУП НИКИЭТ, 2008. – С.27-29.
7. Курганов В.А. Теплообмен и сопротивление в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя.– Теплоэнергетика, 1998. – вып.3. - 2 с.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М: Наука, 1974. –711 с.

**Условные обозначения**

$c$  – теплоемкость;  $\tau$  – касательное напряжение;  
 $f(\rho, T)$  – удельная энергия Гельмгольца;  $v$  – удельный объем;

$g(p, T)$  – удельная энергия Гиббса;  
 $G$  – генерация турбулентной энергии;  
 $h$  – энтальпия;  
 $I, J, n$  – коэффициенты и показатели степеней уравнений;  
 $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  
 $T$  – температура;  
 $Tu$  – турбулентность;  
 $p$  – давление;  
 $q$  – плотность теплового потока;  
 $r, z$  – цилиндрические координаты;  
 $w$  – скорость;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $\beta$  – приведенное давление;  
 $\lambda$  – теплопроводность;  
 $\mu$  – динамическая вязкость;  
 $\gamma$  – энергия Гиббса;  
 $\Phi$  – энергия Гельмгольца;

$\rho$  – плотность;  
 $\theta$  – приведенная температура;  
 $\Sigma$  – сумма

**Индексы нижние:**

$eff$  – эффективный параметр;  
 $t$  – турбулентный параметр;  
 $w$  – стенка

**Индексы нижние:**

0 – идеально-газовая часть;  
 $r$  – реальная часть

ЯЭУ – ядерные энергетические установки;  
СКД – сверхкритическое давление;  
КПД – коэффициент полезного действия;  
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор