KTA 3102.4

Auslegung der Reaktorkerne von gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren

Teil 4: Thermohydraulisches Berechnungsmodell für stationäre und quasistationäre Zustände im Kugelhaufen

Diese Regel wurde veröffentlicht im BAnz. Nr. 40a vom 27.02.85. Die im Banz. Nr. 124 vom 07.07.89 veröffentlichte Berichtigung wurde eingearbeitet.

Der KTA hat auf seiner 47. Sitzung beschlossen, diese HTR-Regel nicht mehr in die Überprüfung gemäß Abschnitt 5.2 der Verfahrensordnung des KTA einzubeziehen.

Inhalt

Seite

Vorbemerkung 1

1 Anwendungsbereich 2

2 Verwendete Symbole 2

3 Modellgleichungen 2

3.1 Gas 2

3.2 Kugel 3

4 Randbedingungen für die Modellgleichungen des Gases 3

4.1 Gesamte Kugelschüttung 3

4.2 Teilgebiete der Kugelschüttung 3

5 Wärme- und strömungstechnische Parameter 3

5.1 Helium-Stoffwerte 3

5.2 Wärmeübergangskoeffizient 3

5.3 Effektive Wärmeleitfähigkeit 3

5.4 Reibungsdruckverlustbeiwert 3

5.5 Kugel-Wärmeleitfähigkeit 3

5.6 Wärmeleistungsdichte 4

6 Dokumentation 4

Anhang A Bestimmungen auf die in dieser Regel verwiesen wird 3

Vorbemerkung

(1) Das Regelvorhaben KTA 3102 "Auslegung der Reaktorkerne von gasgekühlten Hochtempe raturreaktoren" umfaßt den Gesamtbereich der Kernauslegung. Innerhalb des Bereiches der thermodynamischen und strömungstechnischen Kernauslegung gasgekühlter Hochtemperaturreaktoren werden folgende Sachgebiete be arbeitet:

Teil 1: Berechnung der Helium-Stoffwerte (liegt als Regel vor)

Teil 2: Wärmeübergang im Kugelhaufen (liegt als Regel vor)

Teil 3: Reibungsdruckverlust in Kugelhaufen (liegt als Regel vor)

Teil 4: Thermohydraulisches Berechnungsmodell für stationäre und quasistationäre Zustände im Kugelhaufen

Teil 5: Heißstellenanalyse (in Vorbereitung)

(2) Im vorliegenden Teil 4 werden die Anforderungen an das wärme- und strömungstechnische Berechnungsmodell für Kugelhaufenkerne von gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren fest gelegt. Der Kugelhaufenkern besteht dabei aus einer ungeordneten Schüttung von Kugeln gleichen Durchmessers, die in einem zylindrischen Behälter enthalten sind.

(3) Die Temperaturverteilung und Massenstromdichteverteilung in der Kugelschüttung sind für die Auslegung der Brennelemente (Spaltproduktfreisetzung) und der Kerneinbauten so wie für das Reaktivitätsverhalten des Reaktorkerns von sicherheitstechnischer Bedeutung.

1 Anwendungsbereich

(1) Diese Regel ist für stationäre und quasistationäre Zustände des Reaktorkerns von gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren anzuwenden.

(2) Mit dem thermohydraulischen Berechnungsmodell sind die zylindersymmetrischen Verteilungen von Druck, Massenstromdichte und Temperatur des Kühlgases in der Kugelschüttung und das Temperaturprofil in den Kugeln zu berechnen.

(3) Lokale Verteilungen der Massenstromdichte und Gastemperatur im Bereich einzelner Kugeln werden vom Modell nicht erfaßt. Weiterhin werden auch die Temperaturverteilungen im Bereich einzelner beschichteter Brennstoffteilchen in den Brennelementen nicht behandelt.

2 Verwendete Symbole

A_K Oberfläche einer Kugel in der Schüttung

c_p spezifische Wärme des Kühlgases bei konstantem Druck

d_K Durchmesser der die Schüttung bildenden Kugeln

G Betrag der Massenstromdichte bezogen auf den Querschnitt des leer gedachten Volumens

G_r Radialkomponente des Massenstromdichtevektors

G_z Axialkomponente des Massenstromdichtevektors

g Erdbeschleunigung

N Zahl der Kugelsorten (Brennstoffkugeln mit unterschiedlicher Leistung, Moderatorkugeln, Absorberkugeln)

p Druck

Q_j Wärmeleistung pro Kugel der Sorte j

q_K Wärmeleistungsdichteverteilung in der Kugel

q_s Wärmeleistungsdichteverteilung in der Kugelschüttung

r Radialkoordinate in der Kugelschüttung

r_K Radialkoordinate in der Kugel

T absolute Gastemperatur

T_K absolute Temperatur in der Kugel

T_{Oj} absolute Oberflächentemperatur der Kugel der Sorte j

x_j Anteil der Kugeln der Sorte j

z Axialkoordinate in der Kugelschüttung

α Wärmeübergangskoeffizient

ε Lückengrad der Kugelschüttung

ε_s Emissionsgrad der Kugeloberfläche

$\lambda_{eff,r}$ effektive Wärmeleitfähigkeit der durchströmten Kugelschüttung in radialer Richtung

$\lambda_{eff,z}$ effektive Wärmeleitfähigkeit der durchströmten Kugelschüttung in axialer Richtung

λ_K Wärmeleitfähigkeit in der Kugel

Ψ Reibungsdruckverlustbeiwert der Kugelschüttung

ρ Dichte des Kühlgases

σ Stephan-Boltzmann-Konstante

3 Modellgleichungen

3.1 Gas

Die Kugelschüttung ist als Kontinuum in zweidimensionaler Zylindergeometrie zu betrachten. Dabei sind die Massenstromdichte G, der Druck p und die Temperatur T des Gases durch die folgenden Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie und die in Abschnitt 4 angegebenen Randbedingungen bestimmt:

Masse:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rG_r\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(G_z\right)=0 \qquad (3\text{-}1)$$

Impuls:

$$\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{\Psi}{d_K}\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}\frac{G}{2\rho}G_r=0 \qquad (3\text{-}2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\Psi}{d_K}\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}\frac{G}{2\rho}G_z-\rho g=0 \qquad (3\text{-}3)$$

Energie:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_{eff,r}\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{eff,z}\frac{\partial T}{\partial z}\right)-c_pG_r\frac{\partial T}{\partial r}-c_pG_z\frac{\partial T}{\partial z}+\dot{q}_s=0 \qquad (3\text{-}4)$$

3.2 Kugel

(1) Die Oberflächentemperaturen T_{Oj} für N Kugelsorten sind mit folgendem Gleichungssystem zu berechnen:

$$\frac{\dot{Q}_j}{A_K} = \alpha\left(T_{Oj} - T\right) + \varepsilon_s \sigma \sum_{m=1}^{N} x_m \left(T_{Oj}^4 - T_{Om}^4\right) \qquad (3\text{-}5)$$

j = 1 (1) N

(2) Die Temperaturverteilung in den Kugeln ist mit der Wärmeleitungsgleichung

$$\dot{q}_K = -\frac{1}{r_K^2}\frac{d}{dr_K}\left(\lambda_K r_K^2 \frac{dT_K}{dr_K}\right) \qquad (3\text{-}6)$$

und mit den Randbedingungen

$$T_K = T_{Oj} \quad \text{bei } r_K = d_K/2 \qquad (3\text{-}7)$$

$$\frac{dT_K}{dr_K} = 0 \quad \text{bei } r_K = 0 \qquad (3\text{-}8)$$

zu berechnen.

4 Randbedingungen für die Modellgleichungen des Gases

4.1 Gesamte Kugelschüttung

(1) Auf der Zylinderachse der Kugelschüttung gelten die Randbedingungen:

$$G_r = 0 \quad \text{für } r = 0 \qquad (4\text{-}1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{für } r = 0 \qquad (4\text{-}2)$$

(2) An der äußeren Berandung der Kugelschüttung sind

a) Massenstromdichte- oder Druckverteilung,

b) Gaseintrittstemperaturprofil,

c) Energietransport über die Berandung

als Randbedingungen zu definieren.

(3) Für die einzelnen Berandungen sind folgende Effekte zu erfassen:

Seitenreflektor

a) Wärmeübertragung,

b) Leckageströmungen,

c) Gaseintrittstemperatur.

Bodenreflektor

a) Massenstromdichte- oder Druckprofil auf grund radial unterschiedlicher Strömungswiderstände im Bodenreflektor,

b) Wärmeübertragung,

c) Gaseintrittstemperaturprofil bei Aufwärtsströmung in der Kugelschüttung.

Hohlraum über der Kugelschüttung

a) Druck,

b) Massenstromdichte,

c) Wärmeübertragung,

d) Gaseintrittstemperaturprofil bei Abwärtsströmung in der Kugelschüttung.

Kernstäbe

a) aus- oder eintretender Kühlgasstrom des Kernstabes,

b) Eintrittstemperatur,

c) Wärmeübertragung.

Kugelabzüge

Kugelabzüge können entweder als Bestandteil der Kugelschüttung oder durch Randbedingungen beschrieben werden.

4.2 Teilgebiete der Kugelschüttung

Zellrechnungen für Teilgebiete der Kugelschüttung sind erforderlich, wenn lokale Effekte

- im Bereich eingefahrener Kernstäbe,
- in der Umgebung von Schüttkegeln,
- im Bereich von Kugelabzügen

mit dem zweidimensionalen Berechnungsmodell beschrieben werden sollen.

Die Beschreibung der Berandung ergibt sich aus der Kopplung der untersuchten Zelle mit der übrigen Schüttung.

5 Wärme- und strömungstechnische Parameter

5.1 Helium-Stoffwerte

Die Stoffwerte von Helium sind nach der Regel KTA 3102.1 zu berechnen.

5.2 Wärmeübergangskoeffizient

Die Wärmeübergangskoeffizienten in der Kugelschüttung sind nach der Regel KTA 3102.2 zu berechnen.

5.3 Effektive Wärmeleitfähigkeit

(1) Die effektive Wärmeleitfähigkeit der durchströmten Kugelschüttung ist gemäß der Zylindergeometrie in die effektiven Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{eff,r}$ und $\lambda_{eff,z}$ umzurechnen.

(2) Wenn der Einfluß des dispersiven Energietransportes parallel zur Strömungsrichtung auf die Brennelementtemperaturen klein ist, darf vereinfachend isotrop mit der effektiven Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Strömungsrichtung gerechnet werden. Die Zulässigkeit dieses Vorgehens ist zu begründen.

5.4 Reibungsdruckverlustbeiwert

Die Reibungsdruckverlustbeiwerte in der Kugelschüttung sind nach der Regel KTA 3102.3 zu berechnen.

5.5 Kugel-Wärmeleitfähigkeit

Bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit in der Kugel ist die Abhängigkeit von Temperatur und Neutronen-Fluenz zu erfassen.

5.6 Wärmeleistungsdichte

Die Verteilung der Wärmeleistungsdichte in der Kugelschüttung und in den Kugeln ist aus der nuklearen Kernauslegung unter Berücksichtigung der Neutronen- und Gammastrahlung in die Einbauten zu ermitteln.

6 Dokumentation

(1) Die zur Lösung der Modellgleichungen von Abschnitt 3 verwendeten numerischen Verfahren und das auf diesen basierende Rechenprogramm sind zu dokumentieren.

(2) Die Genauigkeit des Rechenverfahrens ist für den Anwendungsbereich anzugeben und zu begründen. Die Genauigkeit wird durch den Vergleich von Rechenergebnissen mit analytischen Lösungen, Nachrechnung von geeigneten Experimenten oder Vergleichsrechnungen mit einem Rechenprogramm mit bekannter Genauigkeit nachgewiesen.

Anhang A

Bestimmungen auf die in dieser Regel verwiesen wird

(Verwiesene Bestimmungen gelten nur in der in diesem Anhang angegebenen Fassung)

KTA 3102		Auslegung der Reaktorkerne von gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren
	(6/78)	Teil 1: Berechnung der Helium-Stoffwerte
	(6/83)	Teil 2: Wärmeübergang im Kugelhaufen
	(6/81)	Teil 3: Reibungsdruckverlust in Kugelhaufen