

Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Proprietà e stabilità di un sistema monofase | 1 |
| 1.1 | Potenziali termodinamici | 1 |
| 1.2 | Relazioni fra i potenziali e le variabili termodinamiche | 4 |
| 1.3 | Stati stabili e metastabili di un sistema monofase | 8 |
| 1.4 | Equazione di stato dei gas ideali e di van der Waals | 12 |
| 2 | Equazioni di conservazione per flussi multifase | 17 |
| 2.1 | Equazione generale di conservazione per un sistema multifase | 17 |
| 2.2 | Equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia | 19 |
| 2.3 | Disuguaglianza dell'entropia ed equazioni costitutive | 23 |
| 2.4 | Sistema di equazioni di Navier-Stokes | 26 |
| 3 | Idrostatica dei sistemi bifase con interfacce | 29 |
| 3.1 | Condizioni per l'equilibrio di un'interfaccia nel caso statico | 29 |
| 3.1.1 | Interfaccia fra due fluidi | 29 |
| 3.1.2 | Interfacce fra più componenti | 36 |
| 3.1.3 | Forza all'interfaccia con tensione superficiale variabile | 39 |
| 3.2 | Forma dell'interfaccia all'equilibrio | 40 |
| 3.2.1 | Parete verticale bagnabile | 41 |
| 3.2.2 | Tubo capillare | 43 |
| 3.2.3 | Goccia appoggiata | 44 |
| 4 | Dinamica dei sistemi bifase con interfacce | 47 |
| 4.1 | Condizioni di equilibrio dinamico | 47 |
| 4.1.1 | Condizioni imposte dall'equazione di continuità | 47 |
| 4.1.2 | Condizioni imposte dall'equazione del moto | 49 |
| 4.2 | Formulazione ad un fluido delle equazioni di conservazione | 50 |
| 4.2.1 | Proprietà della funzione delta di Dirac | 50 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.2.2 | Proprietà fisiche ed equazioni dinamiche nella formulazione ad un fluido | 53 |
| 4.2.3 | Numeri adimensionali per un flusso multifase | 54 |
| 4.3 | Stabilità e instabilità delle interfacce nei sistemi bifase | 55 |
| 4.3.1 | Flusso di Couette con interfaccia | 56 |
| 4.3.2 | Onde di gravità in acque basse | 57 |
| 4.3.3 | Instabilità di Rayleigh-Taylor | 61 |
| 4.3.4 | Instabilità di Kelvin-Helmholtz | 66 |
| 4.3.5 | Instabilità dei getti assialsimmetrici | 69 |
| 5 | Modello a due fluidi per i sistemi bifase | 73 |
| 5.1 | L'equazione di Liouville e di Boltzmann per i flussi bifase | 74 |
| 5.2 | Modello a due fluidi | 77 |
| 5.2.1 | Equazione di continuità | 78 |
| 5.2.2 | Equazione della quantità di moto | 80 |
| 5.2.3 | Equazione per il trasporto di area interfacciale | 82 |
| 5.3 | Approssimazioni del modello a due fluidi | 86 |
| 5.3.1 | Modello a due fluidi e una pressione | 86 |
| 5.3.2 | Modello monodimensionale per flussi bifase | 87 |
| 5.3.3 | Modello monodimensionale stazionario | 90 |
| 6 | Flussi bifase in condotti | 93 |
| 6.1 | Classificazione dei flussi bifase | 93 |
| 6.1.1 | Flussi bifase in condotti verticali | 96 |
| 6.1.2 | Mappa dei regimi di flusso in condotti verticali | 97 |
| 6.1.3 | Flussi bifase in condotti orizzontali | 100 |
| 6.1.4 | Mappa dei regimi di flusso in condotti orizzontali | 102 |
| 6.2 | Calcolo delle perdite di carico nei flussi monofase | 103 |
| 6.2.1 | Bilanci macroscopici stazionari ed equazione di Bernoulli in un flusso monofase | 103 |
| 6.2.2 | Perdite di carico per attrito in un flusso monofase | 105 |
| 6.3 | Calcolo delle perdite di carico nei flussi bifase | 112 |
| 6.3.1 | Modello di flusso bifase omogeneo | 114 |
| 6.3.2 | Modello di flusso bifase con fasi separate | 117 |
| 6.3.3 | Perdite di carico concentrate nei flussi bifase | 125 |
| 7 | Nucleazione omogenea | 127 |
| 7.1 | Condizioni di equilibrio fra le fasi | 127 |
| 7.2 | Equazione di Clausius-Clapeyron | 129 |
| 7.3 | Stati metastabili | 131 |
| 7.4 | Nucleazione omogenea in liquidi surriscaldati | 134 |
| 7.4.1 | Equilibrio di una singola bolla | 134 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.4.2 | Stabilità di una singola bolla | 136 |
| 7.4.3 | Derivazione analitica della variazione della funzione disponibilità per una bolla | 138 |
| 7.4.4 | Barriera di energia | 140 |
| 7.5 | Nucleazione omogenea in vapori sottoraffreddati | 142 |
| 7.5.1 | Equilibrio e stabilità di una singola goccia | 142 |
| 7.5.2 | Derivazione analitica della variazione della funzione disponibilità per una goccia | 144 |
| 7.6 | Confronto tra le curve teoriche e quelle sperimentali | 145 |
| 8 | Nucleazione eterogenea e ciclo dell'ebollizione nucleata | 147 |
| 8.1 | Nucleazione eterogenea e densità dei siti di nucleazione | 147 |
| 8.1.1 | Espressioni analitiche per il volume di una bolla di vapore in una cavità conica | 154 |
| 8.2 | Il modello di Hsu per l'ebollizione nucleata | 158 |
| 8.3 | Crescita di una bolla in una piscina di liquido surriscaldato | 162 |
| 8.3.1 | Regime di crescita inerziale | 163 |
| 8.3.2 | Regime di crescita controllato dal flusso termico | 164 |
| 8.4 | Crescita di una bolla vicino ad una superficie scaldante | 166 |
| 8.5 | Diametro della bolla al rilascio e frequenza del ciclo | 170 |
| 9 | Ebollizione in piscina | 173 |
| 9.1 | Regimi dell'ebollizione in piscina | 173 |
| 9.2 | Meccanismi e modelli per l'ebollizione nucleata | 176 |
| 9.2.1 | Modello di Rohsenow | 177 |
| 9.2.2 | Modello di Forster e Zuber | 178 |
| 9.2.3 | Osservazioni generali sull'ebollizione nucleata | 179 |
| 9.3 | Flusso di calore critico | 179 |
| 9.4 | Ebollizione a film | 181 |
| 9.4.1 | Analisi integrale di Nusselt dell'evaporazione a film | 183 |
| 9.4.2 | Teoria dello strato limite dell'evaporazione a film | 185 |
| 9.5 | Altri fattori che influenzano l'ebollizione | 192 |
| 10 | Ebollizione convettiva in condotti | 195 |
| 10.1 | Regimi dell'ebollizione convettiva | 195 |
| 10.2 | Inizio dell'ebollizione | 200 |
| 10.3 | Ebollizione sottoraffreddata | 204 |
| 10.4 | Ebollizione satura | 207 |
| 10.4.1 | Ebollizione nucleata ed evaporazione convettiva | 207 |
| 10.4.2 | Il coefficiente di scambio termico nell'ebollizione satura | 210 |
| 10.4.3 | La correlazione di Chen | 211 |
| 10.4.4 | La correlazione di Gungor-Winterton | 213 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 10.4.5 | La correlazione di Shah | 214 |
| 10.5 | Condizioni di flusso termico critico | 215 |
| 10.5.1 | CHF: correlazioni per il DNB | 217 |
| 10.5.2 | CHF: correlazioni per il <i>dryout</i> | 219 |
| 10.6 | Trasporto di calore nel flusso a nebbia | 220 |
| 10.7 | Vapore surriscaldato | 222 |
| 11 | Condensazione esterna e interna | 223 |
| 11.1 | Modi di condensazione | 223 |
| 11.2 | Condensazione esterna | 225 |
| 11.2.1 | Condensazione a film su parete verticale | 225 |
| 11.2.2 | Condensazione laminare su un condotto orizzontale | 228 |
| 11.3 | Condensazione interna in tubi orizzontali | 232 |
| 12 | Implementazioni numeriche dei sistemi di equazioni per flussi multifase | 239 |
| 12.1 | Simulazione termoidraulica monodimensionale di un impianto | 240 |
| 12.1.1 | Equazioni per un sistema bifase monodimensionale | 243 |
| 12.1.2 | Flusso di massa all'interfaccia | 246 |
| 12.1.3 | Transizione fra i regimi di flusso | 247 |
| 12.1.4 | Flussi di calore all'interfaccia | 250 |
| 12.1.5 | Flussi di calore alla parete | 251 |
| 12.1.6 | Forza d'attrito all'interfaccia e alla parete | 253 |
| 12.1.7 | Discretizzazione spaziale e temporale | 255 |
| 12.2 | Simulazione termoidraulica tridimensionale di singoli componenti | 255 |
| 12.2.1 | Equazioni tridimensionali per un sistema multifase | 257 |
| 12.2.2 | Concentrazione di area interfacciale | 260 |
| 12.2.3 | Discretizzazione spaziale e temporale | 260 |
| 12.3 | Simulazioni numeriche dirette di fenomeni multifase | 261 |
| 12.3.1 | Tracciamento diretto dell'interfaccia | 263 |
| 12.3.2 | Il metodo dei volumi di fluido (<i>Volume-of-Fluid</i>) | 265 |
| 12.3.3 | Il metodo delle isosuperfici (<i>level-set</i>) | 268 |
| 12.3.4 | Forza di tensione superficiale | 269 |
| A | Calcolo della variazione seconda dell'energia interna | 271 |
| B | Richiami di calcolo tensoriale | 273 |
| B.1 | Sistemi di riferimento e cambiamento di coordinate | 273 |
| B.2 | Tensori di ordine n | 275 |
| B.3 | Operazioni tra tensori | 279 |
| B.4 | Relazioni vettoriali e tensoriali | 282 |

| | | |
|----------|--|------------|
| C | Coordinate curvilinee ortogonali | 283 |
| C.1 | Superfici e linee coordinate, coefficienti di Lamé | 283 |
| C.2 | Sistemi di coordinate cartesiane, cilindriche e sferiche | 287 |
| C.3 | Operatori differenziali | 290 |
| D | Equazioni di Navier–Stokes incomprimibili in coordinate curvilinee ortogonali | 295 |
| | Indice analitico | 299 |