

MARIUSZ ŁACIAK

Zwiększenie efektywności energetycznej odparowania oraz bezpieczeństwa magazynowania skroplonego gazu ziemnego (LNG)

Streszczenie

W pracy podjęto próbę scharakteryzowania procesów termodynamicznych związanych ze skroplonym gazem ziemnym rozładowywanym, magazynowanym i regazyfikowanym w terminalach odbiorczych LNG.

Przedstawione zostały możliwości zwiększenia efektywności energetycznej procesu regazyfikacji LNG przez wykorzystanie czy też odzyskiwanie przynajmniej części „energii zimna” często bezpowrotnie traconej przy zastosowaniu klasycznych metod odparowania LNG. Przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania różnych procesów termodynamicznych oraz wpływu różnych parametrów na egzergię procesu. Proces analizy egzergii jest niezbędny do oceny systemów energetycznych oraz projektowania wysoko wydajnych instalacji kriogenicznych. Wykorzystanie tej wiedzy w projektowaniu metod operacyjnych na terminalu może w znacznym stopniu zwiększyć sprawność cieplną i efektywność egzergiczną procesu rozładunku i regazyfikacji LNG. Może to mieć istotne znaczenie ze względu na oszczędność energii i ochronę środowiska naturalnego.

Dokonano również analizy termodynamicznej i modelowania procesów ekstrakcji cieczy i gazu ze zbiornika LNG z wykorzystaniem energii zimna. Celem było określenie przewidywanej zmienności temperatur, zmian składu oraz zmian nadającej się do wykorzystania energii zimna w trakcie ekstrakcji.

W drugiej części pracy przeprowadzono analizę procesu rozwarstwienia cieczy w zbiorniku, mogącego wystąpić podczas magazynowania skroplonego gazu ziemnego, a prowadzącego do gwałtownego odparowania znacznych ilości LNG, tzw. zjawiska *rollover*. Przedstawione zostały wyniki modelowania tego zjawiska. Istotą modelowania jest określenie zagrożeń związanych z tworzeniem się warstw i stosowne planowanie.

Podstawowym modelem zastosowanym jako bazowy do dalszych obliczeń jest model HSM (Heestand–Shipman–Meader) umożliwiający obliczenie wartości temperatury i składu każdej z dwóch sąsiednich warstw LNG w funkcji czasu. Wielkości podstawowe, w każdym przedstawionym modelu, związane są z przenikającym przez ściany zbiornika ciepłem, uwalnianiem oparów z powierzchni cieczy i prędkością wymiany (ciepła i masy) na powierzchni kontaktu. Rozwiązanie to jest porównawczą metodą obliczeniową, dzięki której wiadomo, jak długo utrzyma się dane rozwarstwienie, zanim osiągnie wcześniej określoną wartość krytyczną.

W następnej części pracy przedstawiono dalszy rozwój rozwarstwienia poza wartość wielkości krytycznej, gdy przeważa zjawisko porywania cieczy z jednej warstwy do drugiej. Przedstawiona została przybliżona metoda mogąca dostarczyć szybkich i dość dokładnych danych dotyczących warunków początkowych fazy porywania.

Opisane zostały metody odwrotne w modelowaniu procesów magazynowania LNG wraz przeprowadzeniem porównawczych obliczeń modelowych do określenia przede wszystkim wartości parametrów przenikania ciepła i masy na podstawie danych i właściwości danego układu zbiornikowego.

W pracy wykonano również model podwójnej dyfuzji lepkiej cieczy w przypadku ucieczek ciepła spowodowanych konwekcją pod wpływem sił wyporu w warunkach kriogenicznych w zbiorniku o kształcie cylindra z przepływem laminarnym. Celem tej części pracy jest ustalenie hydrodynamicznego modelu podwójnej dyfuzji w warunkach stabilnego rozwarstwienia oraz analiza i zbadanie założeń modelowania parametrów skupionych przez porównanie z modelowaniem osiowosymetrycznym dwuwymiarowym rozproszonym. Podstawowa różnica między tymi podejściami tkwi w roli hydrodynamiki. W półempirycznym podejściu parametrów skupionych rola hydrodynamiki sprowadza się do tego, że jej wyniki zostają podsumowane w zakresie współczynników wymiany masy i ciepła, w przypadku których zwykle wymagane są równania różniczkowe cząstkowe z pochodną po czasie. W układzie z parametrami rozłożonymi pojawiają się wielkości sprzężone z transportem masy i ciepła. Rozróżnienie to jest właściwie nieistotne, jeżeli niedostępne są wystarczająco dokładne korelacje. Trudno jest jednak znaleźć doświadczalne korelacje potwierdzające wpływ rozwarstwienia na przenikanie ciepła i masy.

Wysiłki zmierzające do modelowania procesów zachodzących w zbiornikach w trakcie magazynowania LNG napotykać nierzadko na przeszkodę, którą są dane doświadczalne. W pracy podjęto próbę analizy problemów związanych z odbiorem i magazynowaniem LNG na podstawie dostępnych danych literaturowych. Przeprowadzono obliczenia oraz dyskusję nad otrzymanymi wynikami.

MARIUSZ ŁACIAK

Increasing energy efficiency of vaporization and security of liquid natural gas (LNG) storing

Summary

The thermodynamic processes related to liquid natural gas which is unloaded, stored and regasified at LNG terminals are characterized in the paper.

The possibilities of increasing energy efficiency of LNG regasification by using or recovering at least part of cold energy lost during classic LNG evaporation processes is investigated. The usability of various thermodynamic processes and influence of various parameters on process exergy are analyzed. This analysis is required for evaluating energy systems and designing high efficiency cryogenic installations. This knowledge about designing operation methods on the terminal may considerably increase heat efficiency and exergetic efficiency of LNG unloading and regasification. This may turn out important for energy saving and environmental protection.

The processes of liquid and gas extraction from the LNG tank with the cold energy are also subjected to thermodynamic analysis and modeling to predict temperature variability, change of composition and change of cold energy to be used during extraction.

The process of liquid stratification in the tank, which may take place when storing liquid natural gas, and which is a source of rollover effect, i.e. rapid evaporation of considerable amounts of LNG, is modelled in the second part of the paper and the analytical results shown. The objective of this modeling is depicting hazards related to stratification and the respective solutions in planning.

The basic model for further calculations is the Heestand-Shipman-Meader (HSM) model with which the temperature and composition of each of the neighbouring LNG layers can be calculated in a function of time. The basic quantities in each presented model are related with the heat transfer through the sides of the tank, liberation of vapours on the liquid surface and rate of heat and mass exchange on the interface. This is a comparative calculation method informing how long stratification lasts till it reaches a critical value.

The next part of the paper is devoted to the stratification development beyond the critical point, when the liquid is entrained from one layer to another. There follows a description of an approximation method with which considerably accurate data on the initial conditions of the entrainment stage can be quickly given.

Opisane zostały metody odwrotne w modelowaniu procesów magazynowania LNG wraz przeprowadzeniem porównawczych obliczeń modelowych dla określenia przede wszystkim wartości parametrów przenikania ciepła i masy na podstawie danych i właściwości danego układu zbiornikowego.

A double diffusion of viscous liquids was modelled for heat losses due to buoyant convection in cryogenic conditions in a cylindrical tank with laminar flow. This part of the

paper is focused on defining a hydrodynamic model of double diffusion in stable stratification conditions, followed by analysis of assumptions for lumped parameters modelling as compared to a 2D axial-symmetric distributed modelling. The basic difference between the models lies in the role of hydrodynamics. In the semiempirical approach of lumped parameters the role of hydrodynamics is reduced to the fact that its results are summed up for mass and heat transfer coefficients. Effects conjugated with mass and heat transport appear in the distributed system. In fact this differentiation is unimportant if sufficiently accurate correlations are not available. However it is difficult to experimentally find correlations certifying the influence of stratification on heat and mass transfer.

Modelling processes in tanks during LNG storing are frequently hindered by experimental data. Attempts are made to analyze problems related with LNG reception and storing on the basis of available literature data. Calculations were performed and the obtained results are discussed in the paper.

Key words: LNG, liquid natural gas, cryogenics, regasification, energy efficiency, exergy, cold energy, gas and liquid extraction, storing of liquefied gases, LNG stratification, double diffusivity