

УДК 66.046.7:532.5:519.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ НАГРЕТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Хафизов Ильдар Фанилевич^{1,2}, Яхи Абдеслам¹, Попова Елена Викторовна¹,
Хафизов Фаниль Шамильевич¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

²Академия наук Республики Башкортостан, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрен вопрос влияния конвективного теплообмена на нагретой поверхности на процесс охлаждения металлических поверхностей. Было выполнено двумерное численное моделирование атмосферного насыщенного кипения. С использованием численных методов проведено исследование пространственных эффектов образования пара и двухфазного потока, такого как дисперсия фазы в двухфазной смеси. Для исследования использованы данные, экспериментально полученные в течение короткого периода времени после нагрева металлической поверхности и образования пара на поверхности нагрева. Примененный метод моделирования показал надежность, позволяющую проводить стабильные расчеты для широкого диапазона применяемых параметров при моделировании. Изучено образование поверхности нагрева водой и частичное смачивание поверхности при различных значениях поверхностного натяжения. Исследовано влияние поверхностного натяжения на динамику нагрева и охлаждения. Рассмотрено влияние различных поверхностно-активных веществ на процесс охлаждения нагретых металлических поверхностей.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, процесс испарения, процесс конденсации, метод объема жидкостей, теплообмен

INVESTIGATION OF THE COOLING PROCESS OF HEATED METAL SURFACES OF OIL AND GAS EQUIPMENT

Ildar F. Khafizov^{1,2}, Ahi A.¹, Elena V. Popova, Fanil Sh. Khafizov¹

¹Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

²State budgetary Scientific Institution "Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan", Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

ABSTRACT

In this paper, the question of the effect of convective heat transfer on a heated surface on the cooling process of metal surfaces is considered. Two-dimensional numerical sim-

ulation of atmospheric saturated boiling was performed. The spatial effects of vapor formation and two-phase flow, such as phase dispersion in a two-phase mixture, have been studied using numerical methods. The data obtained experimentally during a short period of time after heating the metal surface and the formation of steam on the heating surface were used for the study. The applied modeling method has shown reliability, which allows stable calculations for a wide range of parameters used in modeling. The formation of the heating surface with water and partial wetting of the surface at different values of surface tension have been studied. The influence of surface tension on the dynamics of heating and cooling is investigated. The influence of various surfactants on the cooling process of heated metal surfaces is considered.

Keywords: evaporation process, condensation process, liquid volume method, heat exchange

Введение

Процесс эффективного охлаждения нагретого тела можно охарактеризовать как эффективность удаления тепла с поверхности твердого тела с использованием жидкостей. Данная тема исследования является актуальным вопросом обеспечения процесса пожарной безопасности.

Охлаждение нагретых тел добавлением различных поверхностно-активных веществ для улучшения теплообмена при нагревании – актуальный вопрос для исследования. Поверхностно-активные вещества, которые уменьшают поверхностное натяжение, оказывают влияние на теплопередачу, изменение поверхностного натяжения вследствие изменения диаметра отрыва пузырьков, в частности кипение «зародышей». Несмотря на то, что исследования проводились в течение нескольких десятилетий, полного решения данной проблемы нет. Разнообразие условий неоднородности проведения экспериментов и характеристик материалов (субстратов и жидкостей) приводит к нелинейности процессов и к возможному присутствию гистерезисных явлений (обычно связанных с температурой активации для центра

зародышеобразования, значительно превышающей ожидаемое или теоретическое значение) [1].

Моделирование кипения требует множества гипотез, обоснованность которых не всегда можно оценить. Это приводит к большому количеству различных моделей, часто с корректирующими факторами. Результаты, предсказанные этими моделями, иногда далеки от экспериментальных результатов. Эксперименты по нагреву металлических поверхностей также вызывают дополнительные трудности: процесс нагревания бывает слишком быстрым; пузырьки, образующиеся на границе раздела фаз, взаимодействуют между собой; свойства материала не всегда четко определены, особенно шероховатость поверхности; физические параметры трудно измерить в жидкостях.

Проведено исследование процесса нагрева и охлаждения с помощью программы ANSYS (FLUENT). В данной работе были рассмотрены численные моделирования с тремя различными значениями поверхностного натяжения ($\sigma = 0.03$ N/m, $\sigma = 0.072$ N/m и $\sigma = 0.12$ N/m), временем пребывания пузырьков 0.2 с и 0.3 с. Исследование показывает влияние этих параметров

на динамику нагрева поверхности, воздействия на нее жидкости для охлаждения и образования кипения.

Для экспериментов определены граничные и начальные условия для численного моделирования. Процесс нагревания будем моделировать в прямоугольном сосуде 40 × 80 мм, из медного материала, с температурой нагрева 400 Кельвин (около 130 °С). Для моделирования процесса используем модель VOD (Volume Of Fluid) и применяем механизм испарения-конденсации.

Моделирование процесса конвективного теплообмена

Методы цифрового моделирования применяем для исследования распределения температуры по нагреваемой металлической поверхности.

Для потока вещества, в котором очевидна граница раздела фаз и используется для отслеживания границы раздела жидкость – газ, применяем метод объема жидкости VOD (Volume Of Fluid). В этом методе объемная доля фазы является переменным параметром в каждой ячейке.

Уравнения, которые необходимо решить при моделировании, представляют собой уравнения сохранения массы, энергии, импульса и объемной доли [2].

$$\nabla \cdot (\rho u) = \dot{\rho}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho c T}{\partial t} + \nabla \cdot (u \cdot \rho c T) = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + h, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho c T}{\partial t} + \nabla (u \cdot \rho u) = -\nabla p + \nabla (\mu \nabla u) + S_s + S_g, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (u \alpha_l) = \frac{\dot{\rho}}{\rho} \alpha_l. \quad (4)$$

Исходный член $\dot{\rho}$ в правых частях уравнений (1) и (4) представляет собой перенос массы в процессе фазового перехода, а исходный член уравнения (2) представляет собой изменение энергии во время фазового перехода. Две объемные силы S_s и S_g в уравнении (3) учитывают силу

поверхностного натяжения и силу тяжести соответственно.

В расчетах также применяется модель расчета поверхностной силы CSF (ContinuumSurfaceForce). В модели CSF поверхностное натяжение может быть записано через скачок давления на поверхности. Сила на поверхности может быть выражена как объемная сила с использованием теоремы о дивергенции [3].

Она имеет следующий вид:

$$S = \sigma \frac{\alpha_l \rho_l k_g \nabla \alpha_g + \alpha_g \rho_l \nabla \alpha_l}{0.5(\rho_l + \rho_g)}, \quad (5)$$

$$n_l = \nabla \alpha_l, k_g = \nabla \cdot \vec{n}_g, \quad (6)$$

$$\vec{n} = \frac{n}{|n|} \quad (7)$$

$$k_l = \nabla \cdot \vec{n}_l, k_g = \nabla \cdot \vec{n}_g, \quad (8)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения,

α — объемная доля в контрольном объеме,

ρ — плотность,

n — нормаль к поверхности.

Кривизна k определяется в терминах расхождения единичной нормали \vec{n} . Нижние индексы l и g обозначают жидкую фазу и паровую фазу соответственно. В ячейках, которые содержат две фазы, физические свойства, такие как плотность, динамическая вязкость и теплопроводность, могут быть рассчитаны по средней объемной доле.

Для следующего этапа построения модели рассмотрим модель фазового перехода. Данная модель может быть записана в виде уравнений (9), (10) и (11), где T и T_{sat} — локальная температура и локальная температура насыщения соответственно [7].

Если $T > T_{sat}$, то происходит процесс испарения. Жидкая фаза переходит в паровую фазу, и формулу для массы можно записать следующим образом:

$$M = c_l \alpha_l \rho_l \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}}. \quad (9)$$

В случае $T = T_{sat}$ не происходит ни процесса испарения, ни процесса конденсации.

В случае $T < T_{sat}$ происходит образование конденсата, т. е. осуществляется процесс перехода паровой фазы в жидкую. Массу вещества определяем согласно следующему выражению:

$$M = c_g \alpha_g \rho_g \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}}, \quad (10)$$

где c_l и c_g — коэффициенты релаксации, которые можно искусственно модифицировать для управления скоростью фазового перехода в процессе расчета.

Для поддержания температуры на уровне T_{sat} принимаем коэффициенты равными значению 100 с^{-1} , согласно Wei и Pan (2011). В результате экспериментов принимаем значение $c_l = c_g = 800 \text{ с}^{-1}$ [4, 5].

Для расчета энергии h , которая поглощается или выделяется при фазовом переходе, применяем уравнение (11):

$$h = h_{lg} M, \quad (11)$$

где h_{lg} — скрытая теплота.

Предполагается, что изолиния 0,5 объемной доли является границей раздела пар – жидкость, когда происходит испарение или конденсация, источники массы добавляются в ячейках, которые замкнуты на границе раздела, но точно не содержат границу раздела. Источники массы жидкости и пара имеют одинаковую величину, но противоположный знак. Таким образом, поверхность раздела может быть защищена от деформации во время расчета, а масса консервативна.

Рассмотрим подход к моделированию. С помощью программы ANSYS (FLUENT) были проведены численные моделирования с тремя различными значениями поверхностного натяжения ($\sigma = 0.03 \text{ N/m}$, $\sigma = 0.072 \text{ N/m}$ и $\sigma = 0.12 \text{ N/m}$) и временем пребывания пузырьков 0.2 с и 0.3 с, показывающим влияние этих параметров на динамику

кипения. Нагревание происходит через нижнюю стенку.

Граничные и начальные условия для численного моделирования нагревания моделируются в прямоугольном сосуде размером $40 \times 80 \text{ mm}$, из медного материала, с температурой нагрева стенки 400 Кельвин. В опыте мы использовали модель VOD (Volume Of Fluid) и механизм испарения - конденсации [6, 7].

Модуль Design Modeler (DM) применяем для построения геометрической модели объекта. При моделировании было использовано 17778 элементов.

По результатам моделирования двумерный вид увеличения и динамики пузырька пара в насыщенной среде начинается через 0.2 с от начала кипения.

В результате эксперимента можем отметить, что после 0,3 с с начала кипения различия в количестве и объеме пузырьков пара становятся очень четкими. Также мы замечаем, что пузырьки пара соединяются и образуют пленку пара. При увеличении поверхностного натяжения ($\sigma = 0.12 \text{ N/m}$) паровая пленка играет роль изолятора, который предотвращает контакт между жидкостью и поверхностью нагрева. Это уменьшает теплопередачу и приводит к ухудшению охлаждения поверхности нагрева [8, 9].

На практике для увеличения или уменьшения поверхностного натяжения можно использовать поверхностно-активные вещества, например, карбоксилаты, сульфаты, сульфонаты, бактерицидные, полимерные цепи и т. д. Температура, необходимая для запуска кипения с поверхностно-активным веществом, ниже, чем для воды; пузырьки пара образуются легче, и коэффициент теплопередачи значительно возрастает.

Выводы

Был выполнен комплексный CFD-анализ (Computational Fluid Dynamics

modeling) процесса охлаждения металлических поверхностей. В качестве охлаждающей жидкости в эксперименте использовали как техническую, так и насыщенную воду при атмосферных условиях. Этот анализ также послужил методом проверки возможностей новой численной модели для имитации кипения путем сравнения с экспериментальными данными, доступными в литературных источниках.

В ходе эксперимента было доказано, что паровая пленка образуется на горизонтальной верхней поверхности нагревателя в случае более высокого значения поверхностного натяжения ($\sigma = 0.12 \text{ N/m}$), которое приводит

к повышению температуры поверхности нагреваемой стенки и ухудшению охлаждения. Эти результаты аналогичны результатам прикладных экспериментов.

В работе рассматривается вопрос процесса влияния различных веществ на процесс охлаждения. Добавление поверхностно-активного вещества в воду снижает его поверхностное натяжение. Чтобы улучшить теплопередачу и, следовательно, охлаждать металл, предложено использовать поверхностно-активные вещества, уменьшающие поверхностное натяжение ($\sigma = 0.03 \text{ N/m}$). Добавление ПАВ в воду позволяет снизить время охлаждения аппаратов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яхи А., Хафизов Ф. Ш., Попова Е. В. Численные исследования поверхностного натяжения при зародышеобразовании кипения // Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли: мат. II Международной научно-практической конференции Уфа, 2019. С. 167–168.
2. Zhang, B. J., Kim, K. J., Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Augmentation on Hydrophobic Self-Assembly Mono-Layered Alumina Nano-Porous Surfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 73 (2014), June, pp. 551-561.
3. Sanna, A., et al., Numerical Investigation of Nucleate Boiling Heat Transfer on Thin Substrates, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 76 (2014), Sep., pp. 45-64.
4. Jia, H.W., Zhang, P., Fu, X., Jiang, S.C., 2014. A numerical investigation of nucleate boiling at a constant surface temperature. *Appl. Therm. Eng.*, 1–10.
5. Pezo, M., Stevanovic, V., Numerical Prediction of Critical Heat Flux in Pool Boiling with the Two-Fluid Model, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 54 (2011), 15-16, pp. 3296-3303.
6. Lee, W.H.A., 1980. Pressure iteration scheme for two-phase flow modeling. In: Veziroglu, T.N. (Ed.), *Multiphase transport fundamentals, Reactor Safety*,
7. Stephan, P., Kern, J., Evaluation of Heat and Mass Transfer Phenomena in Nucleate Boiling, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 25 (2004), 2, pp. 140-148.
8. Popova, E.V., Sh Khafizov, F., Gritsay, G.M., Gazizov, A.M. Research on the thermal impact on steel structures of tanks in case of fire. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 6th International Scientific Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, AGRITECH-VI 2021; Krasnoyarsk; Russian Federation; 18 November 2021 до 20 November 2021; Код 177474 Volume 981, Issue 3, 25 February 2022, Номер статьи 032066
9. Хуснутдинова С. М., Хафизов Ф. Ш., Хафизов И. Ф. Определение удельной массовой скорости выгорания многокомпонентных нефтепродуктов // *Безопасность труда в промышленности*. 2021. № 10. С. 49–52.

REFERENCES

1. Yakhi A., Hafizov F. Sh., Popova E. V. Numerical studies of surface tension during boiling nucleation In the collection: Current problems and trends in the development of technosphere safety in the oil and gas industry. Materials of the II International Scientific and Practical Conference. Ministry of Science and Higher Education, Ufa State Petroleum Technical University, 2019; 167–168. (rus).
2. Zhang B. J., Kim K. J., Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Augmentation on Hydrophobic Self-Assembly Mono-Layered Alumina Nano-Porous Surfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2014; 551–561.

3. Sanna A., et al., Numerical Investigation of Nucleate Boiling Heat Transfer on Thin Substrates, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2014; 45–64.
4. Jia H. W., Zhang P., Fu X., Jiang S. C. A numerical investigation of nucleate boiling at a constant surface temperature. *Appl. Therm. Eng.*, 2014; 1–10.
5. Pezo M., Stevanovic V., Numerical Prediction of Critical Heat Flux in Pool Boiling with the Two-Fluid Model, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2011; 3296–3303.
6. Lee W. H. A. Pressure iterations scheme for two-phase flow modeling. In: Veziroglu, T.N. (Ed.), *Multiphase transport fundamentals, Reactor Safety*, 1980.
7. Stephan P., Kern J., Evaluation of Heat and Mass Transfer Phenomena in Nucleate Boiling, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2004; 2: 140–148.
8. Popova E. V., Khafizov Sh. F., Gritsay G. M., Gazizov A. M. Research on the thermal impact on steel structures of tanks in case of fire. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 6th International Scientific Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, AGRITECH-VI 2021. Krasnoyarsk. 2022*, 981 (3). (rus).
9. Khusnutdinova S. M., Hafizov F. S., Hafizov I. F. Determination of the specific mass rate of burnout of multicomponent petroleum products. *Occupational safety in industry*, 2021; 10: 49–52. (rus).

Информация об авторах

Хафизов Ильдар Фанилевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1, профессор, отделение наук о Земле и нефтегазовых технологий, Академия наук Республики Башкортостан, Россия, 450008, г. Уфа, ул. Кирова, д. 15
РИНЦИД: 465802; Scopus Author ID: 7003537835; Researcher ID: 0; ORCID: 0;
e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Яхи Абдеслам, аспирант кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1 РИНЦИД: -; Scopus Author ID: -; Researcher ID: -; ORCID: -;
e-mail: abdobac2011@hotmail.fr

Попова Елена Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пожарной и промышленной безопасности, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, Республика Башкортостан,

Information about the authors

Ildar F. Khafizov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department "Fire and Industrial Safety", Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa, Kosmonavtovstr., 1, 450064, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; Professor, Department of Earth Sciences and Oil and Gas Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Russia, 450008, Ufa, Kirovastr., 15. ID RISC: 465802; Scopus Author ID: 7003537835; Researcher ID: 0; ORCID: 0;
e-mail: fanil150656@mail.ru

Ahi Abdeslam, Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa, Kosmonavtovstr., 1, 450064, Republic of Bashkortostan, Russian Federation;
e-mail: abdobac2011@hotmail.fr

Elena V. Popova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department "Fire and Industrial Safety", Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa, Kosmonavtovstr., 1, 450064, Republic of

г. Уфа, ул. Космонавтов, 1,
РИНЦИД:633418; Scopus Author ID:
8713389800; Researcher ID: 0; ORCID:0009-
0001-0809-2937;
e-mail: evpopova10@yandex.ru

Хафизов Фаниль Шамильевич, доктор
технических наук, профессор, заведую-
щий кафедрой пожарной и промышлен-
ной безопасности, Уфимский государ-
ственный нефтяной технический универ-
ситет, Россия, 450064, Республика Баш-
кортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
РИНЦИД:465802; Scopus Author ID:
7003537835; Researcher ID: 0;
ORCID: 0;
e-mail: fanil150656@mail.ru

Bashkortostan, Russian Federation; ID
RISC633418; Scopus Author ID:
8713389800; Researcher ID:
0;ORCID:0009-0001-0809-2937;
e-mail: evpopova10@yandex.ru

Fanil Sh. Khafizov, Dr. Sci. (Eng.), Professor
Head of the Department "Fire and Indus-
trial Safety", Ufa State Petroleum Techno-
logical University (USPTU), Ufa, Kos-
monavtovstr.,1, 450064, Republic of Bash-
kortostan, Russian Federation; ID RISC:
465802; Scopus Author ID: 7003537835;
Researcher ID: 0;ORCID: 0;
e-mail: fanil150656@mail.ru