

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

SERIES CHEMISTRY AND TECHNOLOGY

ISSN 2224-5286

Volume 5-6, Number 449 (2021), 22-29

<https://doi.org/10.32014/2021.2518-1491.72>

УДК 662.62

Исаева А.Н.¹, Корганбаев Б.Н.¹, Голубев В.Г.¹, Ещенко Л.С.², Жумадуллаев Д.К.^{1*}¹Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан;²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь.

E-mail: daulet_ospl@mail.ru

ОБЪЕМНАЯ КОНДЕНСАЦИЯ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ НА ЧАСТИЦАХ ТУМАНА И КАПЛЯХ В АППАРАТЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ТИПА

Аннотация. Проведен краткий анализ существующих способов конденсации и особенности проведения объемной конденсации в среде, содержащей частицы тумана и капли жидкости. Проведены теоретические исследования процесса зародышеобразования в объеме теплообменного аппарата, Получены теоретические зависимости и дифференциальные уравнения, описывающие работу зародышеобразования, кинетический анализ, а также и теоретическое рассмотрение основных закономерностей влияния заряженных частиц и неконденсирующегося газа на интенсивность зародышеобразования в объеме аппарата в процессе конденсации паров. Получена характерная зависимость равновесного давления пара над поверхностью заряженной частицы от ее радиуса и определен теоретический поток конденсирующихся в объёме аппарата паров. Получено выражение для расчета количества микроскопических центров гетерогенной конденсации в объеме парогазовой смеси и зависимость количества центров объемной конденсации в единице объема от пересыщения при различной насыщенности тумана и капель жидкости в парогазовой смеси.

Ключевые слова: объемная конденсация, частицы тумана, капли жидкости, пересыщение, центров гетерогенной конденсации.

Введение. Конденсация паров из парогазовых смесей широко используется в различных процессах химической промышленности. Конденсация может быть организована непосредственно в объеме аппарата, например на каплях распыленной жидкости, частицах тумана, либо на охлаждаемых поверхностях. Второй способ ведения процесса имеет преимущества с точки зрения лучшей управляемости, а также возможности уменьшения количества загрязненных отходов производства, поскольку поступающая в систему конденсации парогазовая смесь часто содержит пыль или капли тумана, которые захватываются конденсатом и способствует образованию трудноразделимого шлама. Данная проблема характерна для производств фосфора и серы, для электрорудотермических и других теплообменных процессов, отличающихся одновременной конденсацией паров в объеме аппарата, заполненного парогазовой смесью, содержащей частицы тумана и капли распыленной жидкости, а также на охлаждаемых поверхностях [1,2].

При конденсации в объеме пар конденсируется на центрах конденсации, имеющихся в парогазовой смеси или спонтанно образующихся в ней. В этом случае в объеме смеси центрами конденсации служат взвешенные в газовой смеси капли жидкости, частицы тумана, ионы или поверхности спонтанно возникающих в результате флуктуаций зародышей [1,2].

Материалы и методы исследования. Если образование капель фазы конденсата происходит на посторонних частицах или газовых ионах, процесс называется гетерогенной конденсацией. Гетерогенная конденсация имеет две основные стадии: достижение паром состояния пересыщения и его конденсация на ядрах конденсации с ростом их до размеров капель тумана. Если образование капель происходит в результате конденсации пара на самопроизвольно образующихся зародышах, процесс называют гомогенной или спонтанной конденсацией. Процесс гомогенной конденсации пара состоит из следующих стадий: пересыщение пара, образование зародышей и конденсация пара на поверхности зародышей. В любом случае конденсация в объёме парогазовой смеси происходит на поверхности мелких частиц тумана и каплях (рисунок 1).

Для проведения исследований использованы математические численные методы с применением ЭВМ.

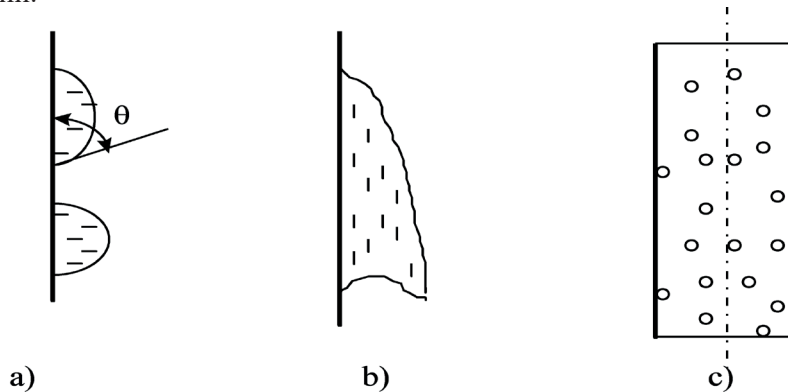
Результат исследования. Таким образом, основными факторами, которые управляют процессом объемной конденсации являются степень пересыщения и дисперсный состав тумана и капель [1,3,4]. На поверхности, содержащихся в смеси частиц тумана и капель жидкости мономолекулярная пленка конденсированной фазы, может образовываться даже ниже давления насыщенного пара, переходя затем в полимолекулярную, которая при дальнейшем насыщении может достигать значительной толщины [5, 6]. Это особенно характерно для паров некоторых веществ (нефтей, масел и т.д.). Если краевой угол смачивания, образуемый капелькой новой фазы и твердой поверхностью, меньше 180° , то работа образования зародыша на поверхности всегда меньше, чем работа образования при гомогенной конденсации. При полном смачивании работа образования теоретически равна нулю [7-10]. Казалось бы необходимо учитывать, что для выпуклой стенки работа образования зародыша больше, а для вогнутой - меньше, чем для плоской стенки. Однако размеры значительной доли включений фазы в виде частиц тумана и частиц жидкости в парогазовой смеси таковы [11], что по сравнению с радиусом микроскопических капелек новой фазы в момент зародышеобразования поверхность частицы можно рассматривать как практически плоскую (рисунок 1).

Тогда работу зародышеобразования можно представить в виде [12]

$$A_* = \frac{1}{3} \pi r_*^2 \sigma_{l/m} (2 - 2 \cos \varphi - \sin^2 \varphi \cos \varphi), \quad (1)$$

где r_* - радиус зародыша новой фазы; $\sigma_{l/m}$ - удельная свободная граничная энергия на поверхности раздела жидкость-твёрдое; φ - краевой угол смачивания.

Кроме того, нужно учитывать, что форма частиц в парогазовой фазе, как правило, далека от сферической. Поэтому на многих из таких частиц происходит капиллярная конденсация. Таким образом, гомогенное образование зародышей вносит весьма небольшой вклад в общую интенсивность объёмной конденсации.



а)- капельная конденсация; б)- пленочная конденсация; с)- конденсация в объеме

Рисунок 1 - Различные режимы конденсации пара.

Однако реальная ситуация все же сложнее. Действительно, при расчёте скорости образования зародышей новой фазы J в единице объема старой фазы необходимо исходить из работы образования зародыша. Но эта работа зависит от поверхности зародыша и различна для различных фракций.

Кинетический анализ, основанный на методах статистической механики, приводит к следующему соотношению [13].

$$J dt = Z_1 \frac{\exp(\lambda/kT)}{\tau_e} \sqrt{3 A_e / \pi kT} \exp(-A_e/kT) dt, \quad (2)$$

где: Z_1 - количество мономолекулярных частиц в единице объема конденсирующейся фазы,

λ - теплота испарения, приходящаяся на одну молекулу,

k - постоянная Больцмана,

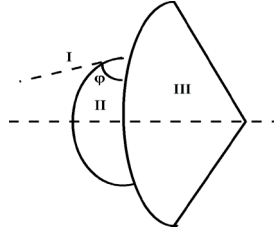
T - температура среды,

τ_e - время построения зародыша [14],

$A_e = \sigma O_e / 3$ - работа образования зародыша,

σ - коэффициент поверхностного натяжения,

O_e - поверхность зародыша.



I- парогазовая смесь; II- капля конденсирующейся фазы; III- частица тумана или капля жидкости.
Рисунок 2- Схема зародышеобразования при гетерогенной конденсации.

С другой стороны, работу образования зародыша можно определить по формуле [15]:

$$A_e = \frac{4}{3} \frac{\omega \sigma^3 v_{II}^2}{(\mu_I - \mu_{II})^2},$$

где μ_I и μ_{II} - гиббсовские термодинамические потенциалы фаз,
 v_{II} -удельный молекулярный объем конденсированной фазы,
 ω -геометрический фактор.

Отсюда следует, что для образования центра конденсации на поверхности частицы тумана и капли жидкости необходимо, чтобы при данной температуре среды и парциальном давлении пара поверхность этой частицы была достаточной для адсорбции слоя жидкости с тем же термодинамическим потенциалом, что и материнская фаза. Образование такой капельки из молекул исходной фазы связано с затратой максимальной работы [12].

Отсюда следует соотношение

$$n_e (\mu_g - \mu_{ls}) = kT \ln(P_g / P_{ls})^{n_e}, \tag{3}$$

где n_e -число молекул в молекулярном комплексе,
 $(\mu_g - \mu_{ls})$ -разность термодинамических потенциалов в двух фазах при температуре среды,
 P_g -парциальное давление пара конденсирующегося компонента в парогазовой смеси,
 P_{ls} -равновесное давление пара.

Используя соотношение (1), приходим к уравнению:

$$Jdt = Z_1 \frac{\exp(\lambda/kT)}{\tau_e} \sqrt{3A_e/\pi kT} (P_g/P_s)^{n_e} \exp(-\sigma O_e/kT) dt \tag{4}$$

Полученное соотношение можно упростить с помощью методов работы [12]. В результате получаем

$$Jdt = C_2 \exp(-A_e/kT) dt, \tag{5}$$

где C_2 приблизительно равно числу двойных соударений молекул пара в единицу времени. Оценка этого параметра может быть получена с помощью методов статистической механики.

Другой аспект проблемы связан с тем обстоятельством, что частицы тумана и капельки жидкости, как правило, несут электрический заряд. Это заряд возникает в результате трения между частицами тумана, каплями жидкости и газом, в результате соударений этих частиц друг с другом, а также при обработке парогазовой смеси в электрофильтрах. В последнем случае оценки величины электрического заряда частиц можно получить из следующих соотношений [16]

$$W_0 = \frac{Eq}{6\pi\mu_g r}, \tag{6}$$

$$q_{max} = E \left(1 + 2 \frac{\epsilon_{de}-1}{\epsilon_{de}+2}\right) r^2, \tag{7}$$

где W_0 - скорость движения частицы в электрическом поле,

E - разность потенциалов,

Q - заряд частицы,

μ_g - в данной формуле динамическая вязкость газа,

ϵ_{de} - диэлектрическая постоянная.

Итак, если учесть заряд частиц, то работа образования заряженной капельки с радиусом r составляет:

$$G_r - G_\infty = \sigma O_{(r)} + (q^2/2r) const, \tag{8}$$

где $(G_r - G_\infty)$ - разность гиббсовых потенциалов,

$O_{(r)}$ - поверхность капельки.

Далее можно получить следующее соотношение [12]

$$(\mu_r - \mu_\infty)_l = kT \ln(P_r/P_s) = 2\sigma v_l/r - q^2 v_l/8\pi r^4. \quad (9)$$

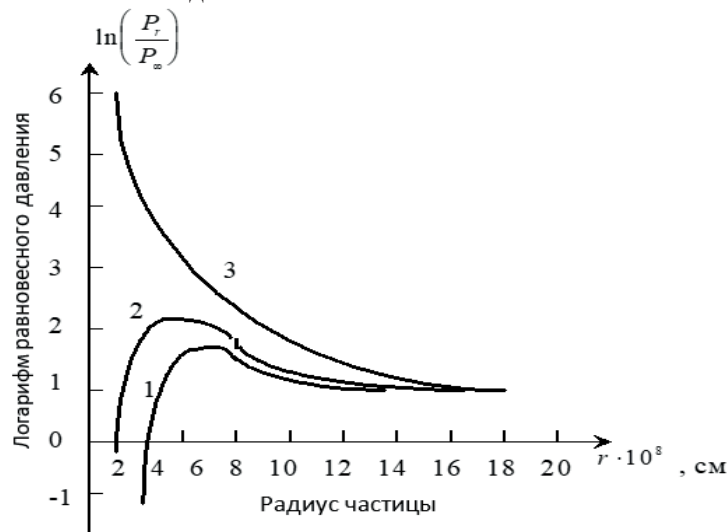
В частности, для конденсации паров воды

$$kT \ln \frac{P_r}{P_s} = \left(\frac{2\sigma}{r} - 0,46 \frac{q^2}{8\pi r^4} \right) v_l,$$

где V_l - объем, приходящийся на одну молекулу конденсирующейся фазы.

Соответствующая функция показана на рисунке 3. Важно отметить, что наличие максимума на кривой зависимости степени пересыщения от радиуса полностью обусловлено зарядом частицы.

Отсюда ясно, что игнорирование этого фактора может приводить к качественным ошибкам при расчетах, а потому должно быть обязательно учтено как при математическом моделировании процесса поверхностной конденсации, так и при проведении экспериментальных исследований и последующей интерпретации обработке опытных данных.



1,2 - заряженные частицы; 3- незаряженные частицы.

Рисунок 3 - Характерная зависимость равновесного давления пара над поверхностью заряженной частицы от ее радиуса.

Обсуждение. На рисунке 4 показана в логарифмических координатах теоретическая зависимость массового потока конденсирующихся в объеме паров за время пребывания парогазовой смеси в аппарате [17-20].

Таким образом, теоретическое рассмотрение основных закономерностей влияния заряженных частиц и неконденсирующегося газа на интенсивность зародышеобразования в объеме аппарата в процессе конденсации паров различных веществ позволяет рассчитать изменение основных параметров процесса конденсации, а именно: температуру смеси и охлаждающей поверхности, количество конденсата, образующегося в объеме аппарата и на охлаждаемой поверхности, а также давление смеси и парциальное давление паров.

Что касается более мелких частиц, то здесь принципиальную роль играет степень пересыщения пара и дисперсный состав частиц тумана и капель жидкости, поскольку центрами конденсации могут стать только частицы тумана и капли жидкости, имеющие характерный размер, превышающий критический радиус зародышей при гомогенной конденсации.

Пусть $F(\delta)$ - массовая функция распределения частиц тумана и каель жидкости в парогазовой смеси, таких что $\delta = O(r_*)$. Тогда общая масса таких частиц в единице объема $m(\delta) = qF(\delta)$, где q - заполненность или насыщенность таких частиц в парогазовой смеси. Согласно опытным данным [18-20] функция распределения капель жидкости и частиц тумана в парогазовых смесях лучше всего аппроксимируется логарифмически нормальным законом:

$$F(\delta) = \frac{1}{\ln \sigma \sqrt{2\pi}} \int_{\delta}^{\infty} \exp \left[- \ln^2 \left(\frac{\delta}{\langle \delta \rangle} \right) / 2 \ln^2 \sigma \right] \frac{d\delta}{\delta}, \quad (10)$$

где через $\ln \sigma$ обозначено среднеквадратическое отклонение логарифмов диаметров частиц тумана и капель жидкости от их среднего значения $\langle \delta \rangle$.

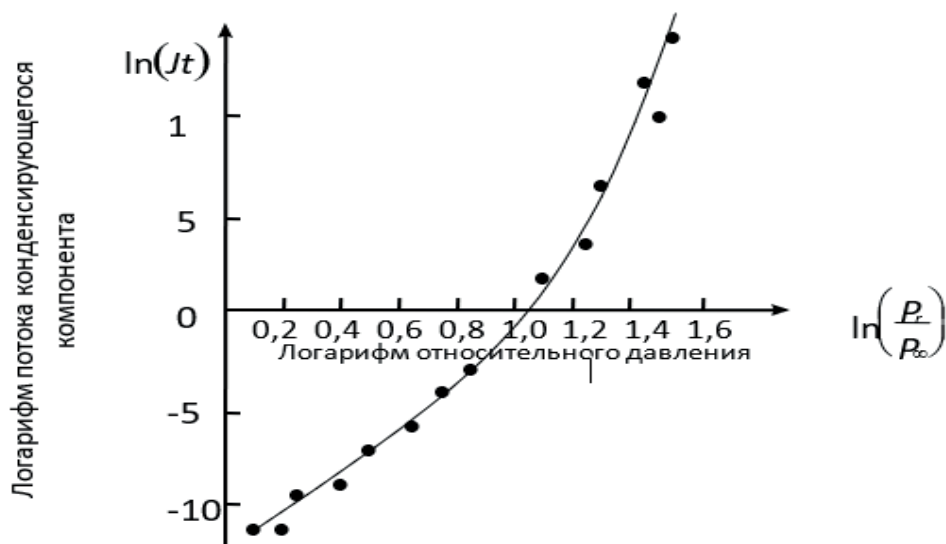
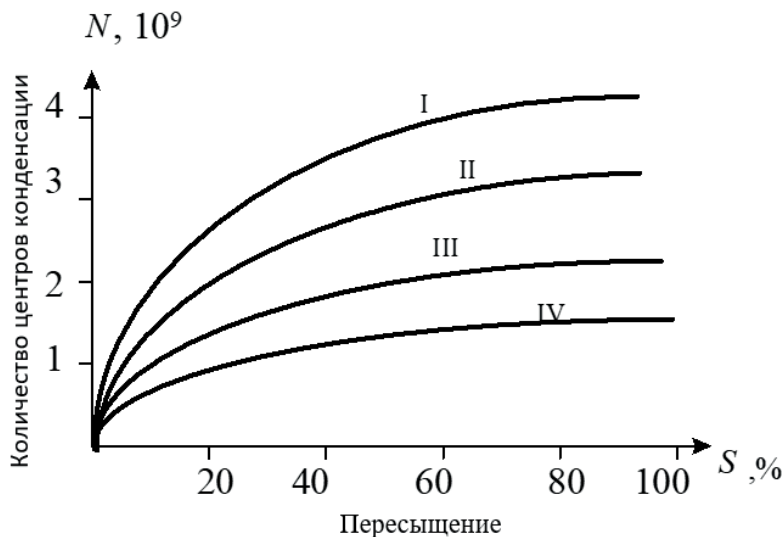


Рисунок 4-Теоретический поток конденсирующихся в объеме аппарата паров.

Таким образом, для расчёта количества микроскопических центров гетерогенной конденсации в объёме заполненной частицами тумана и каплями жидкости парогазовой смеси получаем выражение:

$$N_p = \frac{6g \left[\int_{F(S)}^{\infty} f(r) dr \right]^2}{\pi \rho_p \int_{F(S)}^{\infty} (2r)^3 f(r) dr}, \tag{11}$$

где g - заполненность или насыщенность парогазовой смеси,
 r - радиус частицы тумана или капли жидкости,
 $f(r)$ - функция распределения частиц тумана и капель жидкости по размерам,
 $F(S)$ - функция, описывающая зависимость критического размера от степени пересыщения.



I- $q_0 = 10^{-4} \text{г/м}^3$; II- $q = 0,6 q_0$; III- $q = 0,5 q_0$; IV- $q = 0,4 q_0$.

Рисунок 5 - Зависимость количества центров объёмной конденсации N в единице объема от пересыщения S при различной заполненности частицами тумана и каплями жидкости q парогазовой смеси.

На рисунке 6 представлены характерные данные седиментационного анализа частиц тумана и капель жидкости в парогазовом потоке.

Среднее квадратическое отклонение, измеренное в результате экспериментов $\sigma_{50} = 0,65 \text{ мкм}$.

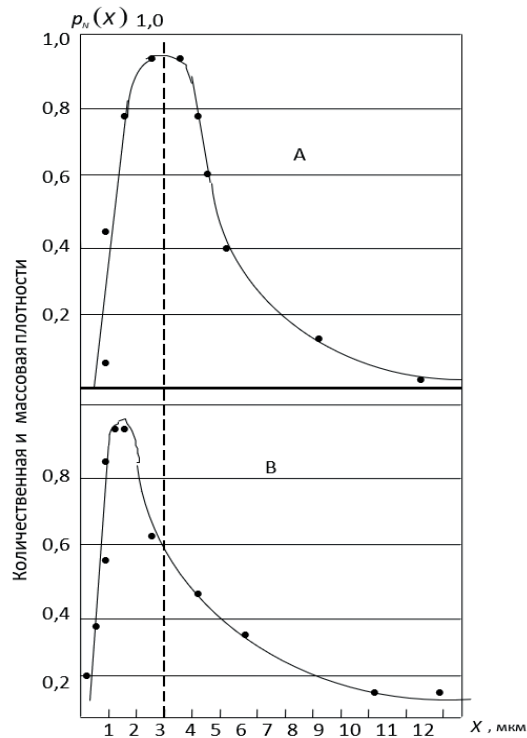


Рисунок 6 - Массовая (А) и количественная (В) плотности распределения.

Размер частиц и их долю определяли путем визуального наблюдения на электронном микроскопе ПРЭМ-20 и последующей графо-аналитической обработке.

Средне медианный размер частиц тумана и капель жидкости в подаваемом парогазовом потоке, рассчитанный по частичной плотности распределения составил 1,8 мкм.

Выводы. В ходе проведенных теоретических исследований объемной конденсации парогазовой смеси на частицах тумана и каплях в аппарате поверхностного типа был изучен процесс зародышеобразования в объеме аппарата. Выполнен кинетический анализ, позволивший получить теоретические зависимости и дифференциальные уравнения, описывающие работу зародышеобразования, а также теоретически рассмотреть основные закономерности влияния заряженных частиц и неконденсирующегося газа на интенсивность зародышеобразования в объеме аппарата в процессе конденсации паров. Получена характерная зависимость равновесного давления пара над поверхностью заряженной частицы от ее радиуса и определен теоретический поток конденсирующихся в объеме аппарата паров. Получено выражение для расчета количества микроскопических центров гетерогенной конденсации в объеме парогазовой смеси и зависимость количества центров объемной конденсации в единице объема от пересыщения при различной насыщенности тумана и капель жидкости в парогазовой смеси.

Исаева А.Н.¹, Корганбаев Б.Н.¹, Голубев В.Г.¹, Ещенко Л.С.², Жумадуллаев Д.К.^{1*}

¹ М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан;

² Беларусь мемлекеттік технологиялық университет, Минск, Беларусь.

E-mail: daulet_ospl@mail.ru

БЕТТІК ТИПТІ АППАРАТТАҒЫ ТҰМАННЫҢ ТАМШЫЛАРЫ МЕН БӨЛШЕКТЕРІНІҢ БУ-ГАЗ ҚОСПАСЫНДАҒЫ КӨЛЕМДІК КОНДЕНСАЦИЯСЫ

Аннотация. Қолданыстағы конденсация әдістеріне және құрамында тұман бөлшектері мен сұйық тамшылары бар ортадағы көлемдік конденсацияны жүргізу ерекшеліктеріне қысқаша талдау жасалды. Жылу алмастырғыштың көлеміндегі нуклеация процесінің теориялық зерттеулері жүргізілді. Ядролану жұмысын, кинетикалық талдауды сипаттайтын теориялық тәуелділіктермен дифференциалдық теңдеулер алынды. Сонымен қатар зарядталған бөлшектер мен конденсацияланбайтын газдың буконденсациясы процесінде аппарат көлеміндегі ядролану қарқындылығына әсер етуінің негізгі заңдылықтары теориялық тұрғыдан қарастырылды. Зарядталған бөлшектің бетіндегі тепе-теңдік бу

қысымының оның радиусына сипаттамалық тәуелділігі алынып, аппарат көлемінде конденсацияланатын булардың теориялық ағыны анықталды. Бу-газ қоспасындағы тұман мен сұйық тамшылардың әртүрлі қанығуларындағы көлем бірлігіндегі көлемдік конденсация орталықтарының санының аса қанығу тәуелдігін және бу-газ қоспасының көлемдік гетерогенді конденсацияның микроскопиялық орталықтарының санын есептеу үшін өрнек алынған.

Түйінді сөздер: көлемдік конденсация, тұман бөлшектері, сұйық тамшылары, аса қанығу, гетерогенді конденсация орталықтары.

Issayeva A.N.¹, Korganbayev B.N.¹, Golubev V.G.¹, Eschenko L.S.², Zhumadullayev D.K.^{1*}

¹ M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan;

² Belorussian State Technological University, Minsk, Belarus.

E-mail: daulet_ospl@mail.ru

VOLUMETRIC CONDENSATION OF A VAPOR-GAS MIXTURE ON FOG PARTICLES AND DROPS IN A SURFACE-TYPE APPARATUS

Abstract. A brief analysis of the existing methods of condensation and the features of carrying out volumetric condensation in a medium containing particles of fog and liquid droplets is carried out. Theoretical studies of the nucleation process in the volume of the heat exchanger have been carried out. Theoretical dependencies and differential equations describing the work of nucleation, kinetic analysis are obtained. As well as a theoretical consideration of the basic laws of the influence of charged particles and non-condensable gas on the intensity of nucleation in the volume of the apparatus in the process of vapor condensation. A characteristic dependence of the equilibrium vapor pressure above the surface of a charged particle on its radius is obtained, and the theoretical flux of vapors condensing in the volume of the apparatus is determined. An expression is obtained for calculating the number of microscopic centers of heterogeneous condensation in the volume of a vapor-gas mixture and the dependence of the number of centers of volumetric condensation per unit volume on super saturation at different saturations of fog and liquid droplets in a vapor-gas mixture.

Key words: volumetric condensation, fog particles, liquid droplets, super saturation, centers of heterogeneous condensation.

Information about authors:

Issayeva Aikerim Nurlankyzy – Master, doctoral student of the Department of Ecology, M. Auezov South Kazakhstan University, e-mail: daulet_ospl@mail.ru, Orcid: 0000-0002-4833-1904;

Korganbayev Baurzhan Nogaybaevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, M. Auezov South Kazakhstan University, e-mail: mr.bours@mail.ru, Orcid: 0000-0001-9428-2536;

Golubev Vladimir Grigorevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Oil and gas business, M. Auezov South Kazakhstan University, e-mail: golubev_50@mail.ru, Orcid: 0000-0001-7370-3872;

Eschenko Lyudmila Semenovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Inorganic Materials Technology and General Chemical Technology», Belorussian State Technological University, e-mail: tnv-ocht@rambler.ru, Orcid: 0000-0002-7356-3942;

Zhumadullayev Daulet Koshkarovich – PhD, senior teacher of the Department of Technological Machines and Equipment, M. Auezov South Kazakhstan University, e-mail: daulet_ospl@mail.ru, Orcid: 0000-0002-6552-2817.

REFERENCES

- [1] Amelin A.G. (1972) Theoretical foundations of fog formation during vapor condensation. Chemistry. Moscow. (in Russ.).
- [2] Postnikov N.N. (1972) Thermal phosphoric acid. Nedra. Moscow. (in Russ.).
- [3] Isachenko V.P. (1977) Heat transfer during condensation. Energy. Moscow. (in Russ.).
- [4] Gran Kh., Lein B. (1969) Aerosols - dust, fumes and mists. Chemistry. Moscow. (in Russ.).
- [5] George M. Hidy. (1984) Aerosols. Academic Press. ISBN 9780323142519. DOI: 10.1016/B978-0-12-347260-1.X5001-6.

- [6] Cheryl A. Brown, George F. Jackson and David A. Brooks. (2000) Particle transport through a narrow tidal inlet due to tidal forcing and implications for larval transport, *J. of Geophysical Research*, 141-156. DOI: 10.1029 / 2000JC000211.
- [7] Folmer M. (1986) Kinetics of the formation of a new phase. Science. Moscow. (in Russ.).
- [8] Eduard Hála, Jiří Pick, Vojtěch Fried and Otakar Vilím (1967) Vapour – Liquid Equilibrium. Pergamon. ISBN 978-0-08-002973-3. DOI: 10.1016/C2013-0-01516-2.
- [9] Lighthill J. (1981) Waves in Liquids. Mir. Moscow. (in Russ.).
- [10] Brenner A.M., Almendinger G.G., Naidenov V.I., Dilman V.V., Golubev V.G. (1989) Non-stationary regimes of film condensation of vapor at low Reynolds numbers due to the dependence of the viscosity of the condensate on temperature [Nestacionarnye rezhimy plenochnoi kondensatscii para primalykhchislakh Reinolda, obuslovlennye zavisimosti uviazkosti kondensata ottemperatury]. Collection of Scientific Works of the 14th Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry [Sbornik nauchnykh Trudov 14 Mendeleevskogo sezdapoobshcheii prikladnoi khimii]: 2:219-223.
- [11] Golubev V.G., Musin N.A., Brenner A.M., Moldabekov Sh.M. (1986) Influence of the dust content of phosphorus-containing gas on the fogging process in surface-type condensers [Vliianie zapylennosti fosfor soderzhashchego gaza naprotcess tumanooobrazovaniia v kondensatorakh poverkhnostnogo tipa]. Modern devices for processing heterogeneous media [Sovremennye apparaty dlia obrabotki geterogennykh sred]:3-7.
- [12] Brenner A.M., Balabekov O.S. (1998) Modelling of heat and mass transfer between drops and gas nearby the unit packing, *Advanced Computational Methods in Engineering*, Shaker Publ, :267-275.
- [13] Adrian B. Burd S.B. Moran, George A. Jackson. (2000) A coupled adsorption - aggregation model of the POC th ratio of marine particles, *Deep - Sea Research I*, 47:103-120. DOI: 10.1016 / S0967-0637 (99) 00047-3.
- [14] George A. Jackson, Adrian B. Burd. (2002) A model for the distribution of particle flux in the mid-water column controlled by subsurface biotic interactions, *Deep-Sea Research II*, 49:193-217. DOI: 10.1016/S0967-0645(01)00100-X.
- [15] Ramkissoon H., Ramdath G., Comission D., Rahaman K. (2006) On thermal instabilities in a viscoelastic fluid, *International Journal of Non - Linear Mechanics*,:18-25. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2005.06.005.
- [16] M. Ali Akbar, M. Shamsul Alam, M.A. Sattar. (2006) KBM unified method for solving an nth order non-linear differential equation under some special conditions including the case of internal resonance, *International Journal of Non - Linear Mechanics*, :26-42. DOI: 10.1016 / j.ijnonlinmec.2005.02.006.
- [17] Adrian B. Burd and George A. Jackson. (2002) Modeling Steady - State Particle Size Spectra, *Environ. Sci. Technol.*, :323-327. DOI: 10.1021/es010982n.
- [18] Kraft M. (2005) Modelling of Particulate Processes, *KONA*, 23:18-35. DOI: 10.14356/kona.2005007.
- [19] Koch D.L., Cohen C. (2000) Turbulent Coagulation of Aerosol Particles, *Proceedings of the Fifth Microgravity Fluid Physics and Transport Phenomena Conference*, NASA Glenn Research Center, :1365-1367.
- [20] Crank J. (1975) The mathematics of diffusion. Oxford. ISBN 0-19-853344-6.