



# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОЖИДКОСТНОГО СЛОЯ В АБСОРБЕРАХ

Атауллаев О.Х.<sup>1</sup>, Эргашева Л.У.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Навоийский государственный университет, DSc., профессор

E-mail: odilataullaev@gmail.com

<sup>2</sup>Навоийский государственный университет, студент

**Аннотация.** В работе исследованы энергетические параметры, определяющие гидродинамическое состояние газожидкостного слоя, формирующегося на тарелках массообменных аппаратов. На основе энергетического подхода выполнен анализ соотношения кинетической энергии газового потока и энергии, затрачиваемой на преодоление сопротивления жидкого слоя. Установлено влияние вязкостных свойств и поверхностного натяжения жидкости на формирование структуры газожидкостного слоя. Обоснована целесообразность использования безразмерных критериев для учета указанных факторов при выполнении инженерных расчетов.

**Ключевые слова:** газожидкостный слой, энергетические параметры, гидродинамика, массообменные аппараты, тарельчатая колонна, вязкость, поверхностное натяжение.

**Annotation.** The study examines the energy characteristics governing the hydrodynamic behavior of a gas–liquid layer formed on the trays of mass transfer equipment. An energy-based framework is applied to evaluate the balance between the kinetic energy of the gas stream and the energy dissipated due to hydraulic resistance of the liquid phase. The effects of liquid viscosity and surface tension on the structural features of the gas–liquid layer is identified. The applicability of dimensionless parameters for incorporating these factors into engineering design and calculation procedures is substantiated.

**Key words:** gas–liquid layer, energy parameters, hydrodynamics, mass transfer apparatus, tray column, viscosity, surface tension.

**Annotatsiya.** Maqlada massa almashinuvi apparatlari tarelkalarida shakllanadigan gaz–suyuqlik qatlamining gidrodinamik holatini belgilovchi energetik parametrlar tadqiq etilgan. Energetik yondashuv asosida gaz oqimining kinetik energiyasi bilan suyuqlik qatlamining hidravlik qarshilik energiyasi o'tasidagi o'zaro nisbat tahlil qilingan. Suyuqliknинг yopishqoqligi va sirt tarangligining gaz–suyuqlik qatlamining tuzilishiga ta'siri aniqlanib, ushu omillarni muhandislik hisoblarida inobatga olish uchun o'lchamsiz mezonlardan foydalanishning maqsadga muvofiqligi asoslاب berilgan.

**Kalit so'zlar:** gaz–suyuqlik qatlami, energetik parametrlar, hidrodinamika, massa almashinuvi apparatlari, tarelkali kolonna, yopishqoqlik, sirt tarangligi.

## Введение

Формы существования двухфазной системы газ (пар) - жидкость, частным случаем которой является газожидкостный слой на тарелках, весьма многочисленны. Фазы образуют сложные и быстро меняющиеся во времени структуры. Движение фаз может быть прямогонным и противогонным, перекрестного и смешанного тока с самыми различными комбинациями перемешивания жидкости и газа. Подобное многообразие форм двухфазных систем создает затруднения в определении их гидродинамического состояния. Не менее существенным затруднением является наличие двух фаз, оценка состояния которых по канонам классической гидродинамики требует расчета системы дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкой и газовой фаз и взаимодействия фаз, что приводит к использованию многочисленных тензоров напряжений, каждый из которых в свою очередь описывается дифференциальным уравнением [1-3].

В результате получается громоздкая система из десятка и более дифференциальных уравнений, решение которой возможно только для отдельных частных случаев.

© International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences Vol.4(6), 2025, IF=4.372, ICV:59.77



Гидродинамическое состояние однофазных систем оценивается критериями Re, Fr, Eu, H0, которые представляют собой отношение силы инерции к силам вязкости (критерий Re), силе тяжести (критерий Fr) и т. д.

Иначе говоря, оценка гидродинамического состояния однофазного потока производится по отношению сил энергии к противодействующим ей силам. Для двухфазных систем, создающихся на тарелках абсорбера и скруббера, сила инерции определяется потоком газа, а силы противодействия зависят от гидростатического давления слоя жидкости, физико-химических свойств газа и жидкости и некоторых других факторов [4].

В наиболее общем случае гидродинамика описывается системой дифференциальных уравнений. Без учета взаимо-ействия фаз такая система уравнений включает уравнения Навье–Стокса для газовой и жидкой фазы и условия однозначности. Тогда

$$P_{rg}-grad P_{rg}+M_2 W_r=P_r D_{wr}/Dt \quad (1)$$

$$P_{jk}-grad P_{jk}+M_j W_j=P D_{wj}/Dt \quad (2)$$

$$div W_r=0, div W_j=0 \quad (3)$$

Учитывая взаимодействия между фазами и долю содержания фаз и, будем иметь:

$$P_r D_{wr}/Dt = P_{rg}-grad P_r + \mu_r 2 W_r + Diag \quad (4)$$

$$P_j D_{wj}/Dt = P_{jk}-grad P_j + \mu_j 2 W_j + Diag \quad (5)$$

$$div W_r=0, div W_j=0 \quad (6)$$

Из приведённых уравнений видно, что силам инерции противодействуют сила тяжести, гидростатическое давление, сила вязкости и сила взаимодействия фаз в виде поверхностного натяжения [5].

Переходя от дифференциальных уравнений (4), (5) к расчётным зависимостям, получаем:

$$W_r P_r/2 = h_{rg} \Phi_1 \alpha_r \Phi_2 \alpha_g \quad (7)$$

$$W_j P_j/2 = h_{jk} \rho_j \Phi_1 \alpha_j \Phi_2 \alpha_g \quad (8)$$

В уравнениях (7), (8)  $\Phi_1$  описывает влияние сил вязкости, сил вязкости,  $\Phi_2$  — влияние сил поверхностного натяжения.

Складывая (7) и (8) и учитывая, что  $(\alpha_r + \alpha_j) = 1$  а  $\rho_r \leq \rho_j$ ,  $P_r \leq P_j$  будем иметь:

$$W_r P_r/2 + W_j P_j/2 = h_{jk} \rho_j \Phi_1 \Phi_2 \quad (9)$$

В условиях использования провальных тарелок при пульсирующей работе отверстий с чередованием через одно отверстие стока жидкости и прохода газа кинетической энергией слоя жидкости, задержанной на тарелке,

$$W_j P_j/2$$

можно пренебречь и тогда кинетическая энергия газов (Па) будет равна:

$$W_r P_r/2 = h_{jk} \rho_j \Phi_1 \Phi_2 \quad (10)$$

Уравнение (10) показывает, что гидродинамическое состояние газожидкостного слоя зависит от соотношения кинетической энергии газа

$$\mathcal{E}_k = W_r P_r/2$$

и энергии сопротивления слоя жидкости  $\mathcal{E}_n = h_{jk} \rho_j \Phi_1 \Phi_2$

Гидродинамическое состояние газожидкостного слоя может быть также выражено через отношение мощности потока газа к мощности противодействующих сил  $N_k$ . Правомерность отношения  $N_k N_n$  для характеристики гидродинамического состояния системы газ–жидкость определяется уравнением.

$$P d/dt(w/2) = <f_w> - div(p<w>). \quad (11)$$

Уравнение показывает, что мощности потока газа ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ ) противодействует мощность, определяемая силами Стокса ( $f_w$ ) и мощность, определяемая силой давления  $P(w)$ .

Мощность газового потока (Вт) определяется по уравнению:



$$N_k = m_r w_{20}/2 \quad (12)$$

здесь  $W_0$  в случае ситчатых тарелок — скорость истечения газа через отверстие в тарелке, а при наличии псевдоожженного слоя орошаемой насадки  $W_0$  — расчетная скорость движения газа в гипотетической тарелке, понятие о которой будет рассмотрено ниже [6].

При поперечном сечении колонны, равным  $F_k$ , расход газов (в кг/с):

$$m_r = F_k W_0 P_r \quad (13)$$

$$N_k = 0,5 F_k w_{30} P_r \quad (14)$$

Для характеристики мощности противодействующих сил определим её как произведение массы жидкости, задержанной на тарелке с учетом влияния вязкости  $F_1$  и поверхностного натяжения  $F_2$ , на теоретическую скорость жидкости.

Расход жидкости (в кг/с):

$$m_r = F_k h_{prj} \Phi_1 \Phi_2$$

Теоретическую скорость жидкости  $W_{0jk}$  найдем из уравнения для определения динамического напора, когда этот напор создается слоем жидкости, задержанной на тарелке.

Динамический напор с учетом  $\Phi_1 \Phi_2$  (в м):

Хотите, я соединю этот кусок (стр. 33) с предыдущим (стр. 34) в единый цельный текст, чтобы у вас был полный отрывок без разрывов?

$$\Phi_1 \Phi_2 h_{jk} = W_{0jk}/2g \quad (15)$$

Тогда

$$N_p = m_r W_{0jk}/2 = F_k h_{prj} g \Phi_1 \Phi_2 2gh \Phi_1 \Phi_2 \quad (16)$$

Определение гидродинамического состояния газожидкостного слоя может быть также произведено по отношению действительной мощности, затрачиваемой на образование газожидкостного слоя, к силе сопротивления слоя жидкости, задержанной на тарелке  $G_jk \Phi_1 \Phi_2$

Действительная мощность газа в (Вт), затрачиваемая на образование газожидкостного слоя:

$$N = p F_k w \quad (17)$$

$$G_jk \Phi_1 \Phi_2 = F_k h_{prj} g \Phi_1 \Phi_2 \quad (18)$$

$$N / G_jk \Phi_1 \Phi_2 = P_w / h_{prj} \Phi_1 \Phi_2 g = N_{yg} \quad (19)$$

является удельным расходом мощности, который показывает мощность газового потока, расходуемого на один ньютон веса жидкости при образовании газожидкостного слоя.

В соответствии с приведёнными данными, в качестве энергетических параметров, описывающих гидродинамическое состояние газожидкостного слоя, можно принять следующие величины:

$\mathcal{E}_k = W_{02} P_r / 2$  - кинетическая энергия потока газа, Па;

$E_{pl} = h_{prj} g \Phi_1 \Phi_2$  - энергия сопротивления слоя жидкости, находящейся на тарелке, с учетом влияния сил вязкости  $\Phi_1$  и сил поверхностного натяжения  $\Phi_2$  Па;

$N_k = m_r W_{02}/2 0.5F_k w_0^3 P_r$  - Мощность газового потока, Вт,

$N_p = m_r W_{0jk}/2 = F_k h_{prj} g \Phi_1 \Phi_2 2gh \Phi_1 \Phi_2$

мощность противодействующих сил (сопротивление слоя жидкости, выраженное в единицах мощности), Вт;

$N = P F_k w$  - действительная мощность газа, затрачиваемая на создание газожидкостного слоя, Вт.

$G_jk \Phi_1 \Phi_2 = F_k h_{prj} g \Phi_1 \Phi_2$  - сила сопротивления слоя жидкости, Н.

Для определения гидродинамического состояния газожидкостного слоя могут служить отношения найденных энергетических параметров

$$\mathcal{E}_k / E_{pl}; N_k / N_p; N_{yg} = N / G_jk \Phi_1 \Phi_2$$



Гидродинамическое состояние газожидкостного слоя зависит от влияния сил вязкости и поверхностного натяжения на границе раздела фаз в случае чистых жидкостей. Влияние осложняется при наличии растворенных веществ, а тем более поверхностно-активных компонентов. Воздействие вязкости газа и жидкости, поверхностного натяжения, растворенных и поверхностно-активных веществ сказывается на структуре газожидкостного слоя, а, следовательно, и на гидродинамических режимах в виде изменений пузырей газа и прочности их как в период образования, так и при всплыvании. Несомненно, что при этом изменяется и вид газовых струй. Влияние растворенных веществ заметно меняется с изменением концентрации последних. Так, в смеси этиловый спирт - вода при содержании первого компонента в количестве 1-2 проц. возникает вспенивание системы уже при небольших скоростях газа (пара). Дальнейшее увеличение количества спирта уменьшает вспенивание и по своим гидродинамическим свойствам образующаяся динамическая пена мало отличается от динамической пены чистых жидкостей.

Известно также, что размер пузырей воздуха в обычной воде значительно меньше, чем в дистиллированной вода в влияние вязкости. Таким образом нужно ожидать, что жидкости и газа, влияние поверхностного натяжения могут проявляться в противоречивых формах, что видно из анализа работ и, соответственно, описываются в виде отличающихся друг от друга многочисленных эмпирических уравнений. Для упрощения расчетных зависимостей влияние вязкости среды и поверхностного натяжения на Эп выражим в виде безразмерных соотношений  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . В качестве определяющих параметров в этих соотношениях приняты вязкость воды, вязкость воздуха и поверхностное натяжение воды.

Тогда величины  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  описываются в виде зависимостей:

$$\Phi_1 = (\mu_g / \mu_w) \cdot m \quad (20)$$

$$\Phi_2 = (\sigma_{g/w} / \sigma_{w/w}) \cdot \eta \quad (21)$$

$$\Phi_2 = (\sigma_{g/w} / \sigma_{w/w}) \cdot m \cdot \eta \quad (22)$$

Зависимость (20) справедлива для системы, где сплошной фазой является газ или воздух; зависимость (21) может быть введена в расчет, когда сплошной фазой является жидкость.

Приведенные соотношения выведены, исходя из предположения, что на сопротивление газожидкостного слоя основное влияние оказывает вязкость сплошной среды. Такое предположение в известной степени подтверждается физическим смыслом процесса, а также уравнениями массоотдачи. Последнее доказательство основывается на том, что коэффициент массоотдачи увеличивается по мере роста гидравлического сопротивления газожидкостного слоя. Отсюда можно считать, что между интенсивностью переноса вещества и Эп существует прямая зависимость.

Определение влияния вязкости на коэффициент массоотдачи произведем исходя из уравнения:

$$N_{ud} = 0,65 P_{ed}^{0,5} (M_c + M_d/M_c)^{0,5} \quad (23)$$

Подстановка численных значений  $M_c$  и  $M_d$  для случая, когда сплошная фаза жидкость и когда сплошная фаза газ, показывает, что основное влияние на  $N_{ud}$  а значит и Эп оказывает вязкость сплошной фазы.

Численные значения показателей  $t$  и  $p$  в отношениях (20) и (21) определяются режимами движения сплошной фазы. Соответственно значения  $t$  и  $p$  при ламинарном к турбулентному режиму переходе от 1,0 до 0,2.

По данным ряда исследователей, работа, затрачиваемая на отрыв пузыря газа от стенки или на разрушение пузыря газа, пропорциональна поверхностному в первой степени, что (22)  $m=1$ .

Таким образом, для расчета Эп с достаточной точностью можно считать, что при турбулентном режиме сплошной фазы



$$\Phi_1 = (\mu_f/\mu_b)0,5 \text{ или } \Phi_1 = (\mu_j/\mu_h2o)0,25$$
$$\Phi_2 = (\sigma_k \sigma_h2o)1,0 ,$$

в случае ламинарного движения сплошной фазы

$$\Phi_2 = (\sigma_k \sigma_h2o)1,0 \text{ или } \Phi_1 = (\mu_j/\mu_h2o)1,0$$

В работе исследованы энергетические параметры, определяющие гидродинамическое состояние газожидкостного слоя, формирующегося на тарелках массообменных аппаратов. Показано, что вследствие сложной пространственной структуры газожидкостного слоя и интенсивного взаимодействия фаз применение классических гидродинамических моделей двухфазных систем существенно ограничено. В этой связи энергетический подход представляется более целесообразным и удобным инструментом для выполнения инженерных расчетов.

Установлено, что гидродинамическое состояние газожидкостного слоя определяется соотношением кинетической энергии газового потока и энергии, затрачиваемой на преодоление сопротивления слоя жидкости. В качестве обобщающих характеристик предложено использовать отношения энергетических параметров и мощностей, такие как  $E_k/E_p$ ,  $N_k/N_p$ , а также удельный расход мощности  $N_{ud}$ , позволяющие объективно оценивать режимы работы аппаратов и переходные процессы между ними.

Показано, что существенное влияние на формирование структуры газожидкостного слоя оказывают вязкость сплошной фазы и поверхностное натяжение на границе раздела фаз. Для учета данных факторов в расчетах обосновано применение безразмерных коэффициентов  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , значения которых определяются режимом движения фаз и физико-химическими свойствами системы. Установлено, что при турбулентном режиме течения влияние вязкости ослабевает, тогда как поверхностное натяжение сохраняет определяющую роль в процессах образования и разрушения газовых пузырей.

Таким образом, использование энергетического подхода позволяет упростить анализ гидродинамики газожидкостных систем, обеспечить требуемую точность инженерных расчетов и эффективно применять его при проектировании, оптимизации и анализе работы тарельчатых колонн и других массообменных аппаратов.

### Список использованной литературы:

- [1]. Атауллаев О.Х. Тарелки со слоем псевдоожиженной насадки и без неё уменьшенной энергоемкости// Монография, Навоий. 2021. 108 с.
- [2]. O.X. Ataullaev, A.O. Ataullaev, Sh.B. Ochilov, B.T. Bisenova, M.Sh. Boltaeva. Double-Row Tube Lattice Plates and Jet Plates with Organized Drainage of Liquid// Jilin Daxue Xuebao (Gongxueban)/Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition) ISSN: 1671-5497 E-Publication: Online Open Access Vol: 42 Issue: 01-2023 DOI 10.17605/OSF.IO/SXUCY. – PP. 223-240.
- [3]. Атауллаев О.Х., Атауллаев А.О. Алгоритмы синтеза и вероятности срыва для оптимального слежения в следящих системах Журнал «Развитие науки и технологий» - Бухара, 2022. - №3. – С. 217-224.
- [4]. Energy-Based Analysis of Gas–Liquid Hydrodynamics on Tray Columns // Chemical Engineering Science. — 2022. — Vol. 247. — pp. 117–128.
- [5]. Energy Dissipation and Flow Structure in Gas–Liquid Tray Columns // Processes. — 2022. — Vol. 10. — pp. 1764–1775.
- [6]. Юсупов Р.Б., Нурматов Х.К. Совершенствование конструкций тарелочных массообменных аппаратов // Прикладные научные исследования. — Самарканд, 2020. — №1. — С. 133–140.