

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДВУХФАЗНЫХ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ: СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД

Бабенко А. В.,

научный сотрудник, к. т. н., ООО «НТП Трубопровод», babenko@truboprovod.ru

Корельштейн Л. Б.,

зам. директора по науке, к. ф. - м. н., ООО «НТП Трубопровод», korelstein@truboprovod.ru

В статье рассказано о современных подходах к моделированию двухфазных газо-жидкостных течений в трубах. Приведено описание одной из наиболее известных современных моделей — TUFFP Unified model. Авторами разработан и реализован в рамках программного комплекса «Гидросистема» механизм точной настройки модели Unified на основе базы данных экспериментов. Применение данного механизма позволяет существенно увеличить точность расчета и при этом избавить конечного пользователя, не всегда являющегося экспертом в области двухфазных течений, от необходимости настройки модели.

Введение

Промышленность впервые столкнулась с многофазным течением более ста лет назад, однако попытки описать многофазное течение в строгой математической форме впервые были предприняты около 60 лет назад. При этом за последние 30 лет произошел крупный скачок в области математического моделирования многофазных течений. *Рис. 1* показывает эволюцию моделирования многофазных течений, опираясь на наиболее значимые работы в этой области.

«Эмпирический период» (1950 – 1975):

Эти модели полностью опирались на экспериментальные данные или данные измерений с промышленных установок и имели ограниченную область применения.

«Период пробуждения» (1975 – 1985):

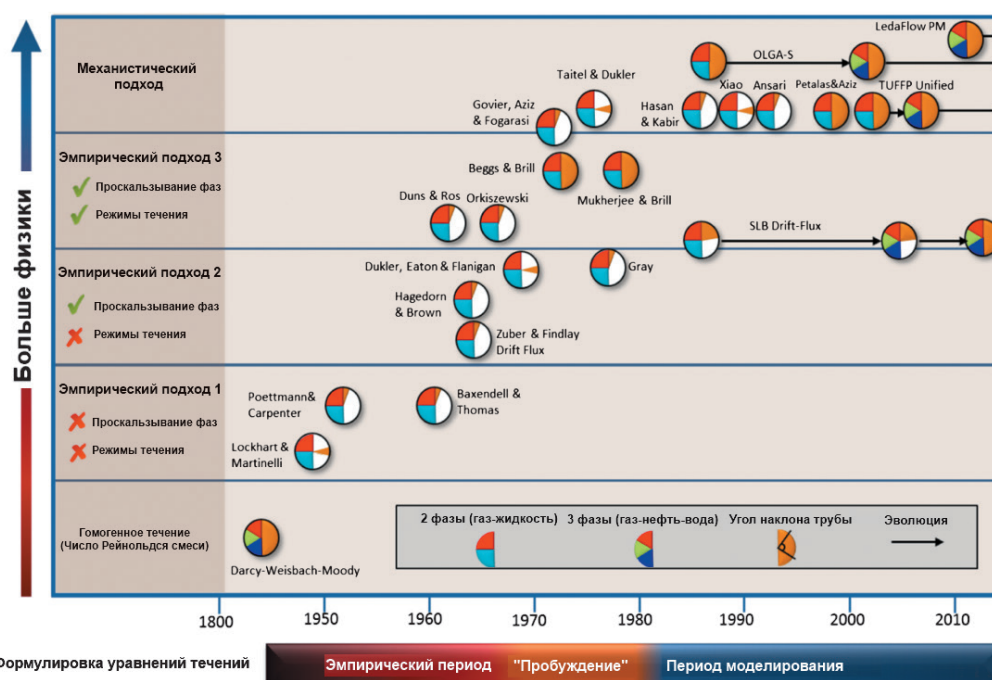
В ответ на растущее осознание недостатков эмпирического подхода исследователи стали уделять большее внимание физике многофазных течений.

«Период моделирования» (1980 – н. в.):

В текущий период впервые появились модели течения двух и более продуктов, основанные на использовании уравнений неразрывности совместно с уравнениями сохранения энергии, описывающие взаимодействие фаз для различных режимов течения.

Рассмотрим более подробно различные категории моделей, отложенные по оси *y*.

Первые две категории (Однородная равновесная модель и Эмпирический подход



*Рис. 1. Эволюция математического моделирования многофазных течений. По оси *x* отложены годы создания моделей [1]*

уровня 1) основаны на однородной равновесной модели (Homogeneous Equilibrium Model — HEM). Однородная равновесная модель является наиболее простой моделью двухфазного течения. Она не учитывает относительное движение фаз и режимы течения. Суть ее в моделировании течения однородного продукта со свойствами, полученными путем осреднения свойств жидкой и газообразной фазы. При этом могут быть использованы все обычные методы гидромеханики.

Ниже приведены уравнения сохранения количества движения и сохранения энергии для однородной равновесной модели [2] (список условных обозначений см. в конце статьи):

$$\frac{dp}{dl} = \left(\frac{dp}{dl} \right)_f - G^2 \frac{du_m}{dl} - g \rho_m \sin \theta - dp_{local} \quad (1),$$

$$\frac{di_m}{dl} + \frac{G^2}{2} \frac{d(u_m^2)}{dl} + g \sin \theta = - \frac{q}{AG} \quad (2),$$

где $q = (T - T_{env}) / R_{\Sigma}$ — теплотери в окружающую среду.

Как видно из уравнений (1), (2), в динамических членах используется осредненный удельный объем продукта u_m , а в уравнении (1) — осредненная плотность продукта ρ_m в гравитационном члене. При эмпирическом подходе уровня 1 в качестве замыкающих соотношений (дополнительных уравнений для потерь на трение $\left(\frac{dp}{dl} \right)_f$, местных потерь dp_{local} и др.) используются эмпирические соотношения, связывающие характеристики течения многофазного продукта с характеристиками течения каждой отдельной фазы.

Третья и четвертая категории (эмпирические подходы уровня 2 и 3) основаны на модели раздельного равновесного течения (Separated Flow Model — SFM). В модели раздельного равновесного течения фазы рассматриваются по отдельности и могут иметь разные свойства. Фазы движутся с различной скоростью, занимая разные части сечения трубы. Для модели раздельного равновесного течения возникает необходимость вычисления истинного объемного газосодержания ε , с помощью которого рассчитываются скорости фаз.

Уравнения сохранения количества движения и сохранения энергии для модели разделенного течения [2]:

$$\frac{dp}{dl} = \left(\frac{dp}{dl} \right)_f - G^2 \frac{d}{dl} \left[\frac{e^2}{\varepsilon \rho_g} + \frac{(1-e)^2}{(1-\varepsilon) \rho_l} \right] - g \rho_{mv} \sin \theta - dp_{local} \quad (3),$$

$$\frac{di_m}{dl} + \frac{G^2}{2} \frac{d}{dl} \left[\frac{e^3}{\varepsilon^2 \rho_g^2} + \frac{(1-e)^3}{(1-\varepsilon)^2 \rho_l^2} \right] + g \sin \theta = - \frac{q}{AG} \quad (4).$$

Как видно из уравнений (3), (4), в динамических членах при определении удельного объема используется истинное (объемное) газосодержание, а также в уравнении (3) — объемная плотность продукта $\rho_{mv} = \varepsilon \rho_g + (1-\varepsilon) \rho_l$ в гравитационном члене. При этом в качестве замыкающих соотношений (потери на трение $\left(\frac{dp}{dl} \right)_f$, местные потери dp_{local} и др.) в модели разделенного течения могут использоваться соотношения, учитывающие взаимодействие фаз на границе раздела.

Отличие моделей уровня 2 и 3 в том, что модели уровня 3 помимо проскальзывания фаз учитывают различные режимы течения и их специфику для более точного опре-

деления объемного газосодержания и потерь. Одной из первых таких моделей была столь любимая инженерами как в России, так и во всем мире методика Beggs & Brill [3].

Последняя, пятая категория моделей (**Mechanistic**) представляет собой механистическое моделирование многофазных течений. Такие модели называют моделями течения двух или более продуктов (Two/Multi Fluid Model — TFM/MFM). Модель течения двух и более продуктов является наиболее общей и полной. Суть ее заключается в выделении фаз или их частей/объединений в самостоятельные продукты, взаимодействующие с трубой и друг с другом. Примерами таких продуктов могут быть капельная взвесь в ядре газового потока при кольцевом течении или газовые включения в теле снаряда при снарядном течении. Фазы могут течь с разной скоростью по разным частям сечения трубопровода и даже не находиться в равновесии. При этом для каждого из выделенных продуктов в общем случае необходимо записать уравнения неразрывности, сохранения количества движения и энергии, с учетом взаимодействия со стенками трубы и другими фазами.

Наиболее известными представителями моделей нескольких продуктов можно назвать TUFFP Unified Model, LedaFlow Point model и OLGAS Three-Phase Flow Models. Также модели течения двух или более продуктов приведены в работах Р. И. Нигматулина [4,5] и других авторов [6–11].

Основной сложностью моделей течения двух и более продуктов является необходимость описания механики взаимодействия продуктов между собой и со стенкой трубы. При описании подобного взаимодействия зачастую приходится использовать эмпирические замыкающие соотношения, полученные экспериментально.

TUFFP Unified model

Рассмотрим современные механистические модели на примере одной из наиболее известных и широко используемых — TUFFP Unified model [12–13]. Она была предложена в 2003 году профессором Zhang из университета г. Талсы и в настоящий момент активно развивается участниками проекта TUFFP (Tulsa University Fluid Flow Project). Стоит отметить, что организация TUFFP была создана и развивается под патронажем того самого Джеймса Брилла, разработавшего известную модель Beggs & Brill [3].

Модель основана, прежде всего, на математическом описании перемежающегося снарядного течения (Slug Flow), как граничащего со всеми основными другими режимами двухфазного газожидкостного течения.

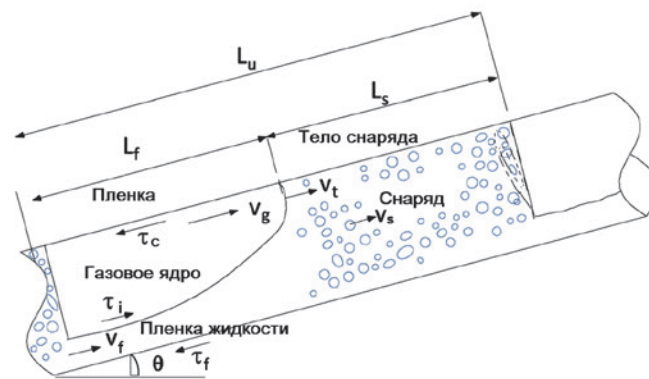


Рис. 2. Схема снарядного течения [14]

Для этого течения записываются уравнения неразрывности (5–8) и комбинированного уравнения сохранения импульса (9):

$$v_S = H_{LF} v_F + (1 - H_{LF}) v_C \quad (5),$$

$$l_U v_{SL} = l_S H_{LS} v_S + l_F (H_{LF} v_F + H_{LC} v_C) \quad (6),$$

$$l_U v_{SG} = l_S (1 - H_{LS}) v_S + l_F (1 - H_{LF} + H_{LC}) v_C \quad (7),$$

$$l_U = l_S + l_F \quad (8),$$

где

H_{LS} — объемная доля жидкости в теле снаряда (slug body);

H_{LF} — объемная доля жидкости в пленке жидкости (slug film);

H_{LC} — объемная доля жидкости в газовом ядре (gas core).

$$\frac{\rho_L (v_T - v_F)(v_S - v_F) - \rho_C (v_T - v_C)(v_S - v_C)}{l_F} - \frac{\tau_F S_F}{H_{LF} A} + \frac{\tau_C S_C}{(1 - H_{LF}) A} + \tau_I S_I \left(\frac{1}{H_{LF} A} + \frac{1}{(1 - H_{LF}) A} \right) - (\rho_L - \rho_C) g \sin \theta = 0 \quad (9).$$

Переходы из одного режима течения в модели TUFFP Unified model также описываются показанными выше уравнениями сохранения и неразрывности и характеризуются выполнением некоторых условий. Например, при переходе из снарядного режима течения в кольцевой длина пленки l_F становится бесконечно большой. Это означает, что в уравнении (9) член, определяющий обмен импульсом между пленкой и снарядом, становится равен нулю, и уравнение приобретает вид:

$$-\frac{\tau_F S_F}{H_{LF} A} + \tau_I S_I \left(\frac{1}{H_{LF} A} + \frac{1}{(1 - H_{LF}) A} \right) - (\rho_L - \rho_C) g \sin \theta = 0 \quad (10)$$

и решается совместно с преобразованными уравнениями (6), (7):

$$v_{SL} = H_{LF} v_F + H_{LC} v_C \quad (11),$$

$$v_{SG} = (1 - H_{LF} + H_{LC}) v_C \quad (12).$$

Подробное описание других режимов течения, а также переходов из одного режима течения в другой подробно описаны в [12–14].

Как видно из уравнений (5–9), TUFFP Unified model, как и другие современные механистические модели, требует замыкающих соотношений для различных параметров, описывающих режимы течения и взаимодействие фаз. Среди них:

- коэффициент межфазного трения;
- коэффициент трения со стенкой;
- объемная доля жидкости теле снаряда (slug body);
- объемная доля жидкости в газовом ядре (gas core);
- объемная доля жидкости в пленке жидкости (slug film);
- смачиваемая поверхность и межфазный периметр;
- скорость перемещения раздела фаз (translational velocity) и длина снаряда.

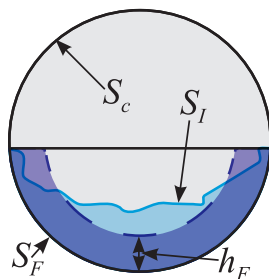


Рис. 3. Поперечное сечение снарядного течения [12]

Для всех этих видов замыкающих соотношений в разные годы было предложено множество различных (по большей части эмпирических) соотношений, основанных на экспериментальных данных. В настоящее время проект TUFFP продолжает на основе проводимых экспериментов активно разрабатывать новые замыкающие соотношения, более точно описывающие различные типы течений.

Автоматический выбор замыкающих соотношений

Основной проблемой практического применения TUFFP Unified model является необходимость выбора замыкающих соотношений, так как большинство из них имеют эмпирическое происхождение и ограниченную область применения.

У авторов статьи есть доступ к базе данных экспериментов по двухфазному течению, включающей более 7000 точек при различных углах наклона, расходах, газосодержаниях и других параметрах. Ведение базы данных является одним из приоритетных проектов TUFFP. База постоянно пополняется новыми выверенными данными и систематизируется.

На основе базы данных экспериментов решено было создать механизм, который бы позволил в процессе расчета динамически выбирать те замыкающие соотношения, которые наилучшим образом описывают данную расчетную точку (сочетание исходных расчетных параметров).

На рис. 4 схематично изображен принцип предложенного механизма.

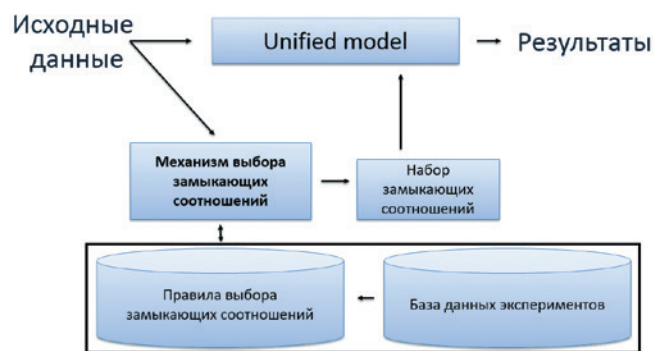


Рис. 4. Предложенный механизм автоматического выбора замыкающих соотношений

На первом этапе на основе базы данных экспериментов формируются правила выбора замыкающих соотношений. Для этого каждая из точек базы данных просчитывается по модели TUFFP Unified Model с каждым из возможных наборов замыкающих соотношений. Это достаточно затратный по ресурсам процесс, но делается он один раз, после чего можно просто пользоваться сформированными правилами. После просчета всех точек отбираются такие наборы замыкающих соотношений, которые дают меньше 20% ошибки по общему градиенту давления.

Далее для каждой из точек рассчитываются параметры, которые можно определить непосредственно на основе заданных исходных данных, и которые наилучшим образом характеризуют двухфазное течение. К таким параметрам

трам на основе анализа размерностей задачи авторы отнесли следующие независимые величины:

- угол наклона трубопровода θ ;

- числа Фруда смеси

$$Fr_M = \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_g} \frac{w_m}{\sqrt{gD}}} = \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_g} \frac{W_g/\rho_g + W_l/\rho_l}{A\sqrt{gD}}};$$

- объемное газосодержание по однородной модели

$$\varepsilon_{HEM} = \frac{W_g/\rho_g}{W_g/\rho_g + W_l/\rho_l};$$

- число Кутателадзе $Ku = \frac{v_m \sqrt{\rho_l}}{[g\sigma(\rho_l - \rho_g)]^{1/4}};$

• числа Рейнольдса для газа $Re_g = \frac{4W_g}{\pi\mu_g D\sqrt{\varepsilon_{HEM}}}$ и жидкости $Re_l = \frac{4W_l}{\pi\mu_l D\sqrt{1-\varepsilon_{HEM}}};$

- отношение плотностей газа и жидкости ρ_g/ρ_l .

Полученные правила представляют собой таблицу из следующих значений:

Табл. 1.

Номер точки	Параметры двухфазного течения (из списка выше)	Наборы замыкающих соотношений
-------------	--	-------------------------------

Когда правила сформированы, расчет происходит следующим образом (рис. 4): исходные данные (расход, газосодержание, плотности, вязкости и др.) попадают в механизм выбора замыкающих соотношений. В механизме выбора по исходным данным рассчитываются те же параметры двухфазного течения, что используются в правилах.

Затем по этим параметрам производится многомерный поиск близких точек в созданных на первом этапе правилах выбора. Для этого используется алгоритм поиска с использованием kd-деревьев, реализованный в программной библиотеке ANN [15].

В результате этого мы получаем три ближайших по свойствам точки из правил выбора. При этом каждая из трех точек содержит по несколько наборов замыкающих соотношений, которые наилучшим образом ее описывают.

Когда три ближайших точки найдены, производится поиск одинаковых наборов замыкающих соотношений в этих точках. Если найден набор, присутствующий во всех трех точках, он подставляется в модель TUFFP Unified Model и производится расчет текущей рассчитываемой точки. Если одинакового набора не находится во всех трех точках, ищется одинаковый в каждой из пар, если и двух одинаковых не находится, берется лучший набор из ближайшей точки.

Таким образом, предложенный механизм на основе экспериментальных данных автоматически выбирает и подставляет в модель наилучший для текущих исходных данных набор замыкающих соотношений, при этом также по мере возможности обеспечивается не очень частая смена набора таких соотношений по ходу течения (что могло бы приводить к искусственным скачкам в результатах расчета).

Сравнение результатов

Для наглядности приводится сравнение расчета градиента давления по устаревшим методикам, по модели Unified с фиксированным (рекомендованным) набором замыкающих соотношений, а также по модели Unified с использованием предложенного авторами механизма автоматического выбора замыкающих соотношений.

В качестве экспериментальных данных берется база данных экспериментов, включающая более 7000 точек.

В качестве первой модели использована эмпирическая модель разделенного течения (separated flow model). Для расчета потерь на трение используется, в зависимости от условий, методы Chisholm [16], Friedel [17] и Lockhart Martinelli [18,19]. Для расчета объемного газосодержания используется соотношение Premoli [20].

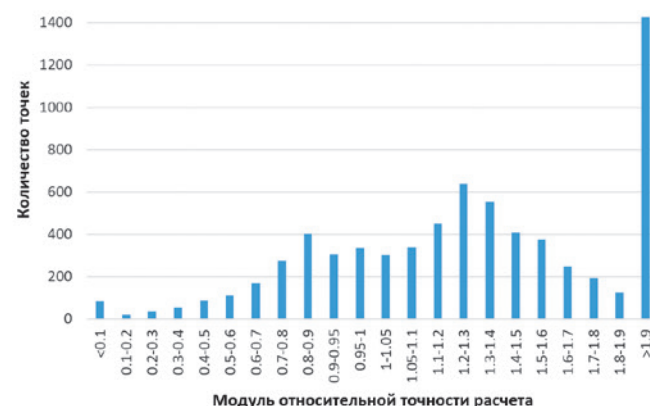


Рис. 5. Гистограмма распределения точности расчета по модели разделенного течения

Из рис. 5 видно, что данная модель дает большой запас по давлению, а во многих случаях вообще дает неадекватные результаты.

Рассмотрим результаты расчета по модели TUFFP Unified Model (рис. 6) в оригинальном варианте с фиксированным набором замыкающих соотношений:

Как видно из рисунка, данная модель уже намного лучше коррелирует с базой данных экспериментов.



Рис. 6. Гистограмма распределения точности расчета по модели Unified

Рассмотрим результаты расчета по модели Unified с предложенным авторами механизмом автоматического выбора замыкающих соотношений (рис. 7)



Рис. 7. Гистограмма распределения точности расчета по модели Unified с предложенным авторами механизмом

Табл. 2. Распределение погрешностей расчета по разным моделям

Модуль относительной погрешности	% от всех точек по Unified model с автоматическим выбором	% от всех точек по Unified model с ручным выбором	% от всех точек по модели разделенного течения
<5%	23%	16%	9%
<10%	46%	33%	19%
<20%	87%	56%	31%
>20%	13%	44%	69%

Как видно из рис. 7 и табл. 2, авторам удалось добиться практически полного попадания результатов в пределах принятой при расчете двухфазных течений погрешности.

Выводы

- Многие используемые в настоящее время методы расчета двухфазных потоков морально устарели и могут сильно завышать потери давления, а то и вовсе приводить к неадекватным результатам.
- Современные механистические модели наподобие TUFFP Unified model значительно увеличивают точность, но требуют грамотного выбора замыкающих соотношений.
- Разработанный и внедренный в программном комплексе «Гидросистема» механизм автоматического выбора замыкающих соотношений позволил существенно увеличить точность расчета и использовать для получения

точных результатов модель TUFFP Unified Model пользователям, не имеющим глубоких знаний в области многофазных течений.

- Предложенный подход позволяет при необходимости настраивать TUFFP unified model на конкретную базу данных пользователей. Уже начат сбор данных по реально действующим трубопроводам членов проекта TUFFP. Авторы всячески заинтересованы и открыты к сотрудничеству с пользователями в этом направлении.

Москва, март 2016 года

Список условных обозначений

Условные обозначения:

- v — скорость, м/с;
 $W = W_g + W_l = const$ — массовый расход, кг/с;
 H — объемная доля газа, -;
 l — длина, м;
 ρ — плотность, кг/м³;
 A — площадь, м²;
 τ — касательное напряжение, Па;
 S — периметр, м;
 μ — динамическая вязкость, Па·с;
 θ — угол наклона трубы к горизонту, рад;
 — объемное газосодержание;

- e — массовое газосодержание;
 G — массовая скорость потока, кг/(м²·с);
 u — удельный объем, м³/кг;
 R — термическое сопротивление, град/Вт;
 i — удельная энтальпия, Дж/кг;
 T — температура, К.

Индексы:

- S — снаряд (slug);
 F — пленка жидкости (liquid film);
 C — газовое ядро (gas core);
 SL — фиктивная для газа;

- SG — фиктивная для жидкости;
 U — Slug unit (снаряд + пленка + газовое ядро);
 T — раздела фаз;
 f — трение;
 mv — среднее по объему;
 m — среднее по массе;
 env — окружающая среда;
 g — газ;
 l — жидкость;
 HEM — гомогенное;
 Σ — суммарное.

Список литературы

1. Shippen M. Steady-State Multiphase Flow — Past, Present, and Future, with a Perspective on Flow Assurance // Energy & Fuels. — 2012. — P. 4145–4157.
2. Чисхолм Д. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках: Пер. с англ. М.: Недра, 1986. 204 с.
3. Beggs H. D., Brill J. P. A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes // J. Pet. Technol. Trans., AIIME. — 1973. — Vol. 25(5). — P. 607–617.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. I. М.: Наука, 1987. 464 с.
5. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. II. М.: Наука, 1987. 360 с.
6. Whalley P. B. The Calculation of Dryout in Rod Bundles // International Journal of Multiphase Flow. — 1977. — Vol. 3. — P. 501–515.
7. Saito T., Hughes E. D., Carbon M. W. Multi-Fluid Modeling of Annular Two-Phase Flow // Nuclear Engineering and Design. — 1978. — Vol. 50. — P. 225–271.
8. Stevanovic V., Studovic M. A Simple Model for Vertical Annular and Horizontal Stratified Two-Phase Flow with Liquid Entrainment and Phase Transitions: One-Dimensional Steady-State Conditions // Nuclear Engineering and Design. — 1995. — Vol. 154. — P. 357–379.
9. Fu F., Klausner J. F. A Separated Flow Model for Predicting Two-Phase Pressure Drop and Evaporative Heat Transfer for Vertical Annular Flow // International Journal of Heat and Fluid Flow. — 1997. — Vol. 18. — P. 541–549.
10. Alipchenkov V. M., Nigmatulin R. I., Soloviev S. L. [et al.] A three-fluid model of two-phase dispersed-annular flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2004. — Vol. 47. — P. 5323–5338.
11. Issa R. I., Kempf M. H. W. Simulation of slug flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model // International Journal of Multiphase Flow. — 2003. — Vol. 29. — P. 69–94.
12. Hong-Quan Zhang, Qian Wang, Cem Sarica, James P. Brill. Unified Model for Gas-Liquid Pipe Flow via Slug Dynamics — Part 1: Model Development // ASME. — DEC 2003. — Vol. 125. — P. 266–273.
13. Hong-Quan Zhang, Qian Wang, Cem Sarica, James P. Brill. Unified Model for Gas-Liquid Pipe Flow via Slug Dynamics — Part 2: Model Validation // ASME. — DEC 2003. — Vol. 125. — P. 274–283.
14. Cem Sarica, Hong-Quan Zhang, Robert J. Wilkens. Sensitivity of Slug Flow Mechanistic Models on Slug Length // ASME. — DEC 2011. — Vol. 133.
15. <https://www.cs.umd.edu/~mount/ANN/>
16. Чисхолм Д. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках: Пер. с англ. М.: Недра, 1986. 204 с.
17. Friedel L. Improved Friction Pressure Drop Correlations for Horizontal and Vertical Two-Phase Pipe Flow. Presented at European Two-phase Flow Group Meeting, Ispra, Italy. Paper E2, June 1979.
18. Chisholm D. Void Fraction during Two-Phase Flow // J. Mechanical Engineering Science. — 1973. — Vol. 15 (3). — P. 235–236.
19. Premoli A., Francesco D., Prima A. An empirical correlation for evaluating two-phase mixture density under adiabatic conditions. In: European Two-Phase Flow Group Meeting, Milan, Italy, 1970.