

УДК 532.542, 532.55, 519.688

## Математическое моделирование установившегося течения двухфазных газожидкостных потоков в промышленных трубопроводах. Расчет ветвей

А.В. Бабенко<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук Л.Б. Корельштейн<sup>2</sup>, д-р техн. наук Т.Н. Гартман<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

<sup>2</sup>ООО «НТП Трубопровод», Москва

E-mail: babenko@truboprovod.ru, тел. (495) 306-34-61 (доб. 233)

E-mail: korelstein@truboprovod.ru, тел. (495) 225-94-31 (доб. 102)

E-mail: gartman@muctr.ru, тел. (499) 978-84-11

Поступила в редакцию: 13.12.2011 г.

В статье приведен общий план иерархии задач расчета установившихся газо-, паро-жидкостных течений в трубопроводах произвольной конфигурации. Предложены и реализованы алгоритмы расчета ветвей и участков ветвей, максимально учитывающие различные факторы, влияющие на процессы в промышленных трубопроводах. Применение программы проиллюстрировано на двух модельных примерах.

**Ключевые слова:** многофазное течение, двухфазное течение, газо-жидкостное течение, режимы течения, вскипание, конденсация, трансферные трубопроводы, трубопроводы обвязки нефтегазовых месторождений, трубопроводы систем обогрева и охлаждения, трубопроводы систем аварийного сброса.

### Введение

Расчет многофазных течений — один из самых сложных и быстроразвивающихся разделов гидравлики трубопроводных систем. Необходимость теплового и гидравлического расчета трубопроводов, транспортирующих многофазные продукты, возникает для самых разнообразных отраслей и видов трубопроводов: технологических (например, так называемых «трансферных» трубопроводов от печей к ректификационным колоннам), трубопроводов систем аварийного сброса, трубопроводов обвязки нефтегазовых месторождений, систем обогрева и охлаждения оборудования и трубопроводов.

Целью работы является разработка программного комплекса широкого применения, осно-

ванного на современных методах расчета двухфазных потоков.

Разрабатываемый программный комплекс должен обеспечить возможность проведения следующих расчетов для однофазных и двухфазных потоков в трубопроводах произвольной конфигурации:

- гидравлический расчет;
- теплогидравлический расчет;
- выбор диаметров трубопроводных систем различного назначения.

Отличительными особенностями разрабатываемого программного комплекса является возможность решения следующих задач для двухфазных потоков:

- автоматическое определение режимов течения;
- выбор (в том числе и автоматический) методик расчета;
  - режимов течения;
  - объемного газосодержания;
  - потерь на трение;
  - потерь в местных сопротивлениях;
- учет кипения или конденсации с применением разработанного алгоритма поиска точек фазовых переходов;
- учет теплообмена с окружающей средой (в том числе в трубопроводах с тепловой изоляцией);
- расчет потокораспределения (трубопроводы сложной топологии);

• работа с различными термодинамическими библиотеками, позволяющими рассчитывать свойства веществ, необходимые для расчетов производные, решать задачи фазового равновесия.

### Иерархия задач

В общем случае создание подобного программного модуля является сложной иерархической задачей, общая схема которой приведена на рис. 1. На верхнем уровне иерархии находится проектный расчет трубопровода. Для решения проектных задач необходим алгоритм оценочного расчета трубопровода сложной топологии (задача потокораспределения). Трубопровод состоит из ветвей — неразветвленных частей с постоянным расходом, следовательно, для расчета трубопровода необходим алгоритм расчета ветвей. Ветви состоят из участков (трубы, отводы, диафрагмы, входы/выходы из трубы, трубопроводная арматура и т.д.), поэтому на нижнем

уровне иерархии лежит задача расчета участков ветвей трубопровода.

В данной статье рассматривается решение задач оценочного расчета ветвей и участков ветвей трубопровода (отмечено пунктиром на рис. 1).

### Расчет ветвей

Под ветвью подразумеваются неразветвленная часть трубопровода с постоянным расходом, состоящая из последовательно соединенных участков ветви. Под участками ветви подразумеваются прямые участки труб, отводы, диафрагмы, входы/выходы из трубы, трубопроводная арматура и др.

#### *Прямой и обратный расчет ветви с учетом возможности критического истечения*

Основная задача расчета ветви заключается в нахождении  $p$ ,  $T$  и  $x$  в конце ветви по заданным исходным данным в начале ветви (прямой расчет) или наоборот (обратный расчет).

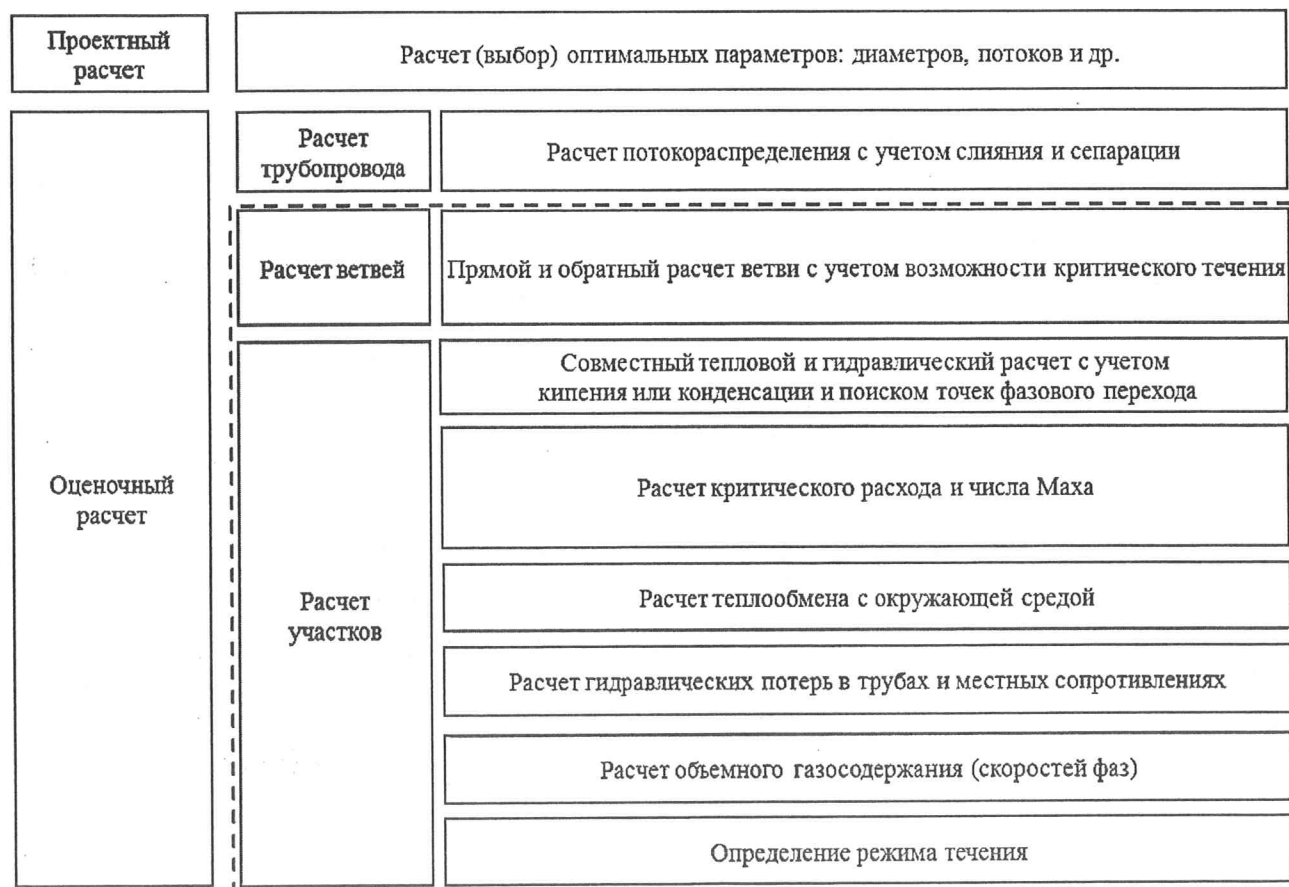


Рис. 1. Схема иерархии задач при оценочном и проектном расчетах трубопроводных систем

Разработанный алгоритм расчета ветви приведен на рис. 2.

В качестве исходных данных для расчета ветви могут выступать пары  $p, T$  и  $p, x$ . В обоих случаях третий параметр рассчитывается автоматически, в зависимости от состава транспортируемого продукта (однокомпонентный/многокомпонентный). Когда третий параметр исходных данных определен, запускается один из двух типов расчета.

Если в качестве исходных данных взяты параметры в начале ветви, запускается прямой расчет. При прямом расчете участки ветви считаются последовательно, начиная с первого. Начальными параметрами при расчете первого участка являются начальные параметры ветви. Рассчитанные конечные параметры участка являются конечными параметрами ветви, если участок последний, либо начальными параметрами для следующего участка.

Если в качестве исходных данных взяты параметры в конце ветви, запускается обратный расчет. При обратном расчете участки ветви считаются последовательно, начиная с пос-

леднего. Конечные параметры ветви являются конечными для последнего участка. После чего производится обратный расчет участка, дающий на выходе начальные параметры участка и т.д. Обратный расчет участка проводят с применением метода простых итераций, что дает приемлемую сходимость (3—10 итераций для каждого из участков).

На данный момент алгоритм расчета ветви не предусматривает расчет критического истечения (планируется реализовать его в ближайшем будущем). Для предотвращения попадания в критическую зону на каждом из участков ветви рассчитывается число Маха. При числе Маха  $\geq 1$  программа оповещает о близости к критической зоне и прекращает расчет.

### Расчет участков ветви

На нижнем уровне иерархии задач (см. рис. 1) стоит задача расчета участков ветви. Под участками подразумеваются прямые участки труб, отводы, диафрагмы, входы/выходы из трубы, трубопроводная арматура и др. Далее рассмотрены теоретические основы расчета двухфазно-

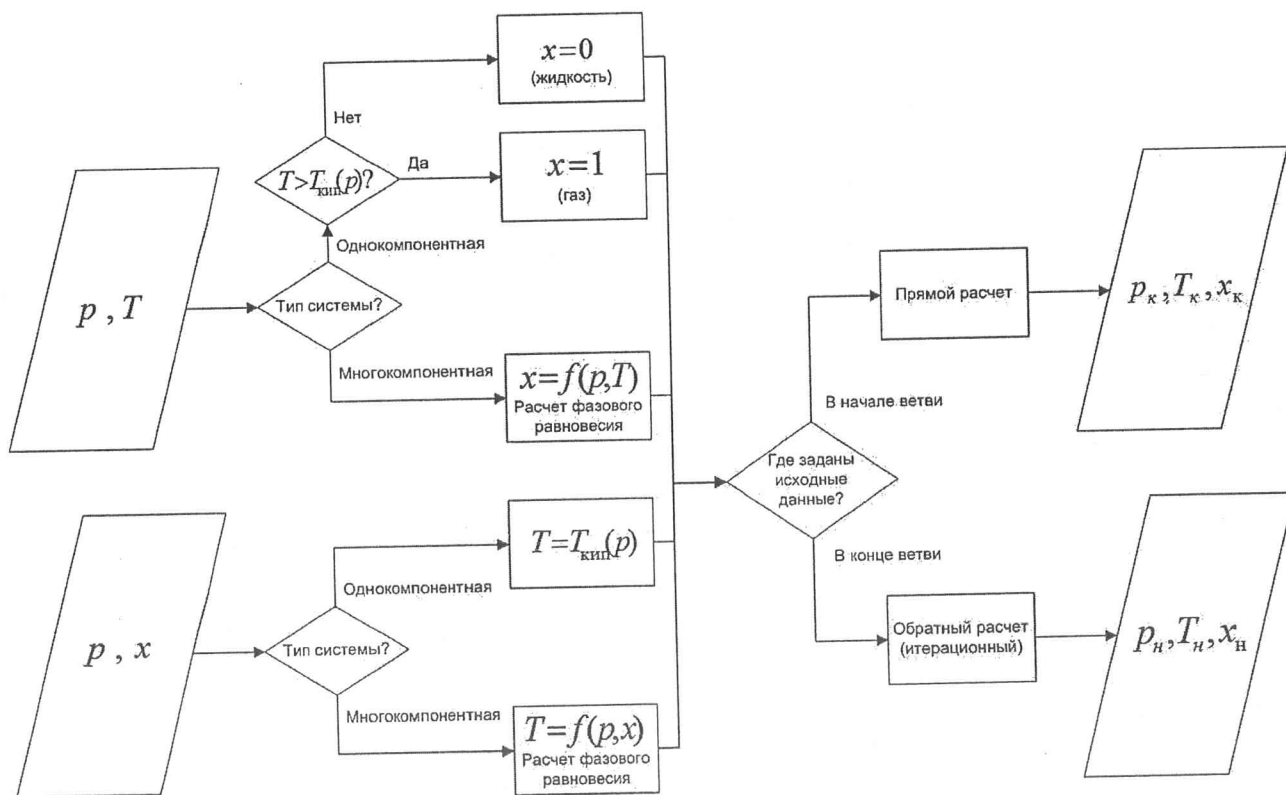


Рис. 2. Алгоритм расчета ветви

го течения и приведен разработанный алгоритм расчета участков ветви.

### Математическая модель

При расчетах двухфазного течения используется смешанная математическая модель.

За основу взята модель равновесного разделенного течения *SFM (Separated Flow Model)* [2]. Уравнения сохранения количества движения (1) и сохранения энергии (2) для модели *SFM*:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp}{dl} &= \left( \frac{dp}{dl} \right)_f - G^2 d \frac{d}{dl} \left[ \frac{x^2}{\varepsilon \rho_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon)\rho_l} \right] - \\ &\quad - g \rho_{mv} \sin \theta - dp_{local} \quad (1) \\ \frac{dh_m}{dl} + \frac{G^2}{2} \frac{d}{dl} \left[ \frac{x^3}{\varepsilon^2 \rho_g^2} + \frac{(1-x)^3}{(1-\varepsilon)^2 \rho_l^2} \right] + \\ &\quad + g \sin \theta = -\frac{q}{AG}, \quad (2) \end{aligned} \right.$$

где теплотери от продукта в окружающую среду на единицу длины равны

$$q = (T - T_{env})/R_{\Sigma}. \quad (3)$$

При этом, согласно рекомендациям *Azzopardi* [3], потери на ускорение при адиабатическом течении и при течении с кипением считаются по модели однородного течения (без «проскальзывания» фаз) *НЕМ (Homogeneous Model)* [2]. При расчете технологических трубопроводов с двухфазными потоками в основном имеет место такой вид течения, поэтому было принято решение использовать эти рекомендации. В дальнейшем возможна реализация более общего случая.

Для модели *НЕМ*

$$\varepsilon = \frac{\rho_m}{\rho_g} x. \quad (4)$$

Тогда средняя массовая плотность и удельный объем равны:

$$\rho_m = \varepsilon \rho_g + (1-\varepsilon)\rho_l = \left[ \frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right]^{-1}, \quad (5)$$

$$u_m = x u_g + (1-x)u_l = \left[ \frac{\varepsilon}{u_g} + \frac{1-\varepsilon}{u_l} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Заменяя в (1), (2) члены динамических потерь с учетом (4)–(6), получим:

$$\left\{ \frac{dp}{dl} = \left( \frac{dp}{dl} \right)_f - G^2 \frac{du_m}{dl} - g \rho_{mv} \sin \theta - dp_{local}, \quad (7) \right.$$

$$\left. \frac{dh_m}{dl} + \frac{G^2}{2} \frac{d(u_m^2)}{dl} + g \sin \theta = -\frac{q}{AG}. \quad (8) \right.$$

При расчете участков конечные давления и энтальпии считаются по формулам (8), (9). Расчет проходит итерационно, при этом длинные участки разбиваются на более мелкие для более точного учета изменения свойств продукта по ходу течения.

$$\left\{ \begin{aligned} p_m^k &= p_m^h - \Delta p_f - G^2 (u_m^h - u_m^k) - \\ &\quad - L g \rho_{mv} \sin \theta - \Delta p_{local}, \quad (9) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} h_m^k &= h_m^h - \frac{q^h + q^k}{2AG} L - \frac{G^2}{2} (u_m^h - u_m^k) - gL \sin \theta. \quad (10) \end{aligned} \right.$$

В полученной смешанной модели динамические потери считаются по модели *НЕМ*, остальные потери (потери на трение, гидростатические потери, потери на местных сопротивлениях и др.) считаются по методикам, описанным ниже.

### Определение режимов течения

Основная особенность двухфазных потоков состоит в том, что по ходу течения они могут образовывать различные пространственные конфигурации фаз, называемые режимами течения (рис. 3). Определение режима течения является первым этапом расчета двухфазных потоков, так как позволяет выявить нежелательные режимы, а также позволит в послед-



Рис. 3. Режимы течения в горизонтальных трубопроводах [1]

дующем реализовать более точные методики расчета, учитывающие параметры конкретного режима течения.

Существующее множество методик определения режимов течения можно разделить на две большие группы:

- Эмпирические.
- Механистические.

На ранних стадиях исследования многофазных потоков преобладали эмпирические модели. Суть их заключается в построении определенных моделей на основе экспериментальных данных, не углубляясь в теорию процесса. Наиболее известными эмпирическими моделями определения режимов течения являются диаграммы Хьюитта и Робертса (*Hewitt* и *Roberts*) [4], Бэйкера (*Baker*) [5] и др.).

Прорыв в моделировании двухфазных потоков произошел в 1976 г., когда впервые появились механистические модели определения режимов течения. В отличие от эмпирических моделей, основанных главным образом на экспериментах, механистические модели описывают физику течения жидкости и газа в трубе, используя законы сохранения и замыкающие соотношения для нахождения определенных параметров системы, таких как высота жидкости или толщина жидкой пленки. Впоследствии эти параметры используются при определении границ перехода от одного режима течения к другому. Основателями механистических моделей были *Yamada Taitel* и *A.E. Dukler*, предложившие первую механистическую модель определения режимов течения для стационарного двухфазного потока в горизонтальной трубе [6]. Данная модель

также работает при наклонах трубы до  $\pm 10^\circ$ . Впоследствии было опубликовано множество различных механистических моделей, наиболее известные из которых *Barnea* (1987) [7], *Petalas* и *Aziz* (1997, 1998) [8] и др.

Исходя из практических соображений, для реализации в программе были выбраны три получивших наибольшую известность и популярность механистических модели (табл. 1).

#### Расчет объемного газосодержания

Расчитанное объемное (истинное) газосодержание используется при расчете гидростатических потерь на перепадах высот, а также некоторых выводимых величин (истинных скоростей фаз и др.). Для расчета объемного газосодержания (табл. 2) в программе реализован целый ряд типов корреляций: *HEM* (однородная равновесная модель течения), корреляции степенного типа, корреляции на основе потока дрейфа и наиболее популярные эмпирические корреляции. Корреляции степенного типа в настоящее время представляют скорее исторический интерес и реализованы для совместимости с другими программами. Для больших и средних скоростей потока можно рекомендовать использовать корреляцию *Premoli* [19], а при небольших скоростях — подходящие по углу наклона потока корреляции *Rouhani* [21–23], *Dix-Ghajar-Woldesemayat* [10] или *Goda-Hibiki-Kim-Ishii-Uhle*. [25] Сравнительный обзор применимости и точности различных методик можно найти в [10].

В дальнейшем планируется реализовать также методики расчета, учитывающие специфику различных режимов течения.

Таблица 1. Заложенные методики определения режимов течения

Наименование методики (модели)	Описание, ссылка на источник	Ограничения, рекомендации по применению
<i>Taitel — Dukler</i>	Самая первая и наиболее известная «механистическая» модель [6]	Только для горизонтальных и почти горизонтальных трубопроводов
<i>Barnea</i>	Первая универсальная «механистическая» модель, охватывающая любые углы уклона трубопровода [7]	Для любых трубопроводов. Рекомендуется использовать по умолчанию
<i>Petalas — Aziz</i>	Одна из наиболее современных моделей [8]. В программе реализована с измененным методом расчета коэффициента межфазного трения, предложенным в [9]	Для любых трубопроводов. Считает несколько более точным, чем <i>Barnea</i> , при определении границ кольцевого режима и учета влияния шероховатости труб



Таблица 2. Заложенные методики определения объемного газосодержания

Наименование методики (модели)	Описание, ссылка на источник	Ограничения, рекомендации по применению
<i>HEM</i>	Объемное газосодержания для течения с одинаковыми скоростями движения фаз <i>Корреляции степенного типа для отношения скоростей фаз</i>	
<i>Zivi</i>	[11]	Классические корреляции данного типа. Имеют ограниченное применение, в программе реализованы для совместимости и сравнения с другими программами
<i>Fauske</i>	[12]	
<i>Thom</i>	[13]	
<i>Baroczy</i>	[14]	
<i>Wallis</i>	[15]	
<i>Lockhart — Martinelli</i>	[16]	
	<i>Отдельные эмпирические корреляции</i>	
<i>Chisholm</i>	[17]	Одна из самых простых, но популярных корреляций, дающая разумные значения при любом газосодержании
<i>Smith</i>	Корреляция, основанная на принципе «равно-скоростного напора» [18]	Простая, но достаточно популярная универсальная корреляция
<i>Premoli</i>	Корреляция, предложенная исследователями группы <i>CISE (Centro Informazioni Studi Esperienze)</i> [19]	Одна из самых точных эмпирических корреляций для предсказания плотности газожидкостного потока (при средних и больших скоростях течения)
	<i>Корреляции на основе модели потока дрейфа</i> [20]	
<i>Rouhani I</i>	Модификация <i>Steiner</i> корреляции <i>Rouhani-Axelsson</i> [21, 23] для горизонтальных потоков	Популярная корреляция данного типа для горизонтальных потоков
<i>Rouhani II</i>	Корреляция <i>Rouhani</i> [21, 22] для вертикальных восходящих потоков	Популярная корреляция данного типа для вертикальных восходящих потоков
<i>Dix</i>	Исходный вариант корреляции <i>Dix</i> [24]	
<i>Dix-Ghajar-Woldesemayat</i>	Модификация корреляции <i>Dix</i> , дополнительно учитывающая угол уклона и давление [10]	Одна из самых точных корреляций данного типа для горизонтальных и восходящих потоков
<i>Goda-Hibiki-Kim-Ishii-Uhle</i>	[25]	Одна из немногих специализированных корреляций данного типа для нисходящего течения

*Расчет гидравлических потерь в трубах и местных сопротивлений*

Для расчета потерь на трение газожидкостного потока на данный момент реализованы два наиболее широко используемых типа корреляций — на основе модели однородного течения и с использованием двухфазных мультипликаторов.

Первая группа методик рассчитывает потери на трение, как для однофазного потока с теплофизическими свойствами газожидкостной смеси. Двухфазность течения при этом учитывается при расчете вязкости смеси (в методике *Beattie — Whalley* [28]) или числа Рейнольдса смеси (в методике *Shannak* [29]).

Во второй группе методик рассчитываются потери на трение для однофазного течения

(для жидкой или газовой фазы) с последующей корректировкой на множители, учитывающие газосодержание и свойства фаз. При реализации в программе методик *Friedel* [30] и *MSH* [31] их возможности несколько расширены по сравнению с авторскими вариантами путем применения для расчета коэффициента гидравлического трения формулы Черчилля (как это рекомендуется в [17]), что позволяет применять их на всем диапазоне значений числа Рейнольдса, а также учесть влияние шероховатости стенок труб. Более детальные рекомендации также предложены в [27].

В дальнейшем планируется реализовать также методики расчета, учитывающие специфику различных режимов течения (табл. 3).

Таблица 3. Заложенные методики расчета потерь на трение

Наименование методики (модели)	Описание, ссылка на источник	Ограничения, рекомендации по применению
<i>Методики на основе однородного течения</i>		
<i>Beattie — Whalley</i>	Популярная универсальная однородная корреляция [28]	
<i>Shannak</i>	Новая универсальная однородная корреляция [29]	
<i>Методики двухфазных мультипликаторов</i>		
<i>Lockhart — Martinelli</i>	Одна из первых (и самая известная) корреляция данного типа [16, 17]	Рекомендуется применять для отношения динамических вязкостей фаз свыше 1000 и массовых скоростей до 100 кг/(м <sup>2</sup> с), особенно для разделенных режимов течения
<i>Chisholm</i>	Одна из самых популярных корреляций данного типа [17]	Рекомендуется применять для отношения динамических вязкостей фаз свыше 1000 и массовых скоростей более 100 кг/(м <sup>2</sup> с)
<i>Friedel</i>	Считается одной из самых точных корреляций данного типа [30]	Рекомендуется применять для отношения динамических вязкостей фаз менее 1000
<i>MSH (Muller-Steinhagen and Heck)</i>	[31]	Успешно применяется для однокомпонентных продуктов и хладагентов

Вопрос расчета потерь давления на местных сопротивлениях для газо-жидкостного течения до сих пор современными исследователями изучен недостаточно. В настоящий момент реализованы основные предложенные для этого случая в литературе методы расчета, представляющие собой разновидности метода двухфазных мультипликаторов для местных сопротивлений. Рекомендации по применению данных методов для различных видов местных сопротивлений даны в [17, 27, 37]. Для типов местных сопротивлений, для которых рекомендации отсутствуют, применяется методика *HEM* (табл. 4).

Таблица 4. Заложенные методики расчета потерь давления на местных сопротивлениях

Наименование методики (модели)	Описание, ссылка на источник	Ограничения, рекомендации по применению
<i>HEM</i>	Расчет как для однофазного потока	Для расчета внезапных сужений, переходов, иных сопротивлений, для которых нет подходящих расчетных методик
<i>Chisholm</i>	[17]	Для расчета отводов, арматуры, диафрагм
<i>Simpson</i>	[32]	Для расчета внезапных расширений, задвижек, диафрагм
<i>Morris</i>	[33]	Для расчета клапанов

#### Расчет теплообмена с окружающей средой

При расчете теплотерь в окружающую среду в уравнении (10) учитываются следующие факторы.

Общее термическое сопротивление  $R_{\Sigma}$  складывается из термического сопротивления трубы  $R_{тр}$ , изоляции  $R_{изол}$ , теплоотдачи от продукта к трубе  $R_{внутр}$  и теплопередачи от поверхности покровного слоя теплоизоляционной конструкции (или трубы) в окружающую среду  $R_{нар}$ .  $R_{нар}$  позволяет учитывать различные расположения трубопровода (на поверхности земли, под землей и т.д.).

$$R_{\Sigma} = (R_{внутр} + R_{тр} + R_{изол} + R_{нар}) / K_{опор}$$

где  $K_{опор}$  — поправочный коэффициент, учитывающий дополнительный теплоток через крепежные детали и опоры (принимается в соответствии с рекомендациями [34]).

Расчет  $R_{внутр}$ ,  $R_{тр}$ ,  $R_{изол}$ ,  $R_{нар}$  производится по методикам, описанным в [34], [38]. При расчете  $R_{внутр}$  для замороженного двухфазного течения также используются корреляции из [39].

#### Расчет критического расхода и числа Маха

Под критическим расходом понимается такой расход, при котором уравнения (7), (8) вырождаются и перестают адекватно описывать течение двухфазной смеси. Физически это озна-

часть неадекватность модели для таких величин расхода из-за нарушения сплошности потока (критическое истечение) либо возникновения существенной термодинамической неравновесности течения. Адекватное математическое описание этих явлений является в последнее время предметом интенсивных международных исследований, соответствующие уточненные модели планируется реализовать в последующем в программном комплексе.

Числом Маха называется отношение текущего расхода к критическому расходу.

Для получения выражения числа Маха запишем уравнения (7), (8) в термодинамических координатах давления и энтропии ( $p$ ,  $s$ ). Учитывая что  $dh_m = Tds_m + u_m dp$ ,

$$\left\{ \frac{dp}{dl} + G^2 \frac{du_m}{dl} = \left( \frac{dp}{dl} \right)_f - \frac{g \sin \theta}{u_m} - dp_{local}, \right. \quad (11)$$

$$\left\{ T \frac{ds_m}{dl} + u_m \frac{dp}{dl} + \frac{G^2}{2} \frac{d(u_m^2)}{dl} = -\frac{q}{AG} - g \sin \theta. \right. \quad (12)$$

Учитывая, что

$$\frac{du_m}{dl} = \left( \frac{\partial u_m}{\partial p} \right)_{s_m} \frac{dp}{dl} + \left( \frac{\partial u_m}{\partial s_m} \right)_p \frac{ds_m}{dl},$$

уравнения (11), (12) можно представить в виде

$$\left\{ \begin{aligned} [1 - M^2] \frac{dp}{dl} &= \left[ 1 + G^2 \frac{u_m}{T} \left( \frac{\partial u_m}{\partial s_m} \right)_p \right] \left( \frac{dp}{dl} \right)_f - \\ &- \frac{g \sin \theta}{u_m} + G^2 \frac{1}{T} \left( \frac{\partial u_m}{\partial s_m} \right)_p \frac{q}{AG} - dp_{local} \\ T \frac{ds_m}{dl} &= -\frac{q}{AG} - u_m \left( \frac{dp}{dl} \right)_f + u_m dp_{local} \end{aligned} \right. ,$$

где число Маха:

$$M = G \left[ - \left( \frac{\partial u_m}{\partial p} \right)_{s_m} \right]^{1/2}.$$

Дальнейший расчет числа Маха зависит от типа системы (однокомпонентная/многокомпонентная).

Для общего случая многокомпонентной смеси  $\left( \frac{\partial u_m}{\partial p} \right)_{s_m}$  удобнее выразить через производные в термодинамических координатах  $p$ ,  $T$ .

Учитывая универсальное термодинамическое соотношение  $ds = \frac{c_p}{T} dT - \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p$ , при постоянной энтропии  $\left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \frac{T}{c_p} \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p$  и  $\left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_s = \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + \frac{T}{c_p} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p \right]^2$ .

Таким образом,  $\left( \frac{\partial u_m}{\partial p} \right)_{s_m}$  может быть рассчитано как

$$\left( \frac{\partial u_m}{\partial p} \right)_{s_m} = \left( \frac{\partial u_m}{\partial p} \right)_T + \frac{T}{c_p} \left[ \left( \frac{\partial u_m}{\partial T} \right)_p \right]^2,$$

причем при расчете производных необходимо учитывать изменение доли отгона и состава фаз. В частности, изобарная теплоемкость должна рассчитываться как  $c_p = \left( \frac{\partial h_m}{\partial T} \right)_p$ .

Для случая однокомпонентной смеси температура продукта  $T = T_{sat}(p)$ , и термодинамическими переменными продукта могут служить  $p$ ,  $x$ .

При этом

$$\left( \frac{\partial u_m}{\partial p} \right)_{s_m, sat} = \left( \frac{\partial u_m}{\partial p} \right)_{x, sat} + \left( \frac{\partial u_m}{\partial x} \right)_p \left( \frac{\partial x}{\partial p} \right)_{s_m, sat},$$

После преобразований получим

$$\left( \frac{\partial u_m}{\partial p} \right)_{s_m, sat} = \frac{u_{gl}}{h_{gl}} \left[ T \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p \right]_m - c_{pm} \frac{dT_{sat}}{dp} \right] + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T \right]_m + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p \right]_m \frac{dT_{sat}}{dp}.$$

В процессе расчета участков ветви постоянно отслеживается значение числа Маха. При  $M \geq 1$  показывается предупреждение, и расчет прекращается.

*Совместный тепловой и гидравлический расчет с учетом кипения или конденсации и поиском точек фазового перехода*

Для возможности выбора наиболее подходящих методик расчета из табл. 1–4 был разра-



ботан настраиваемый механизм, позволяющий выбирать методики по ходу расчета вручную или автоматически, основываясь на имеющихся рекомендациях (подробнее о реализации выбора методик см. в [35]).

Алгоритм расчета участка ветви приведен на рис. 4. В качестве исходных данных принимаются начальные газосодержание, температура и давление, а также общие параметры (расход, тип и геометрия участка и др.). Если газосодержание равно нулю или единице, значит, течение однофазное. В этом случае программа переключается на однофазный расчет и считает конечные значения параметров участка. Если газосодержание лежит в пределах от нуля до единицы, активируется двухфазный расчет. В этом случае определяется режим течения, выбираются методики расчета с использованием правил выбора [35] и производится расчет конечных параметров участка. Если фазовое состояние не изменилось, расчет завершен. Иначе вызывается модуль расчета точки фазового перехода. Для прямых участков труб поиск точки фазового перехода заключается в решении нелинейных уравнений вида  $f(l) = 0$ , где  $l$  — текущая длина трубы. Для решения уравнения данного вида при-

меняется метод *Pegasus* [36]. Конкретный вид уравнения зависит от типа фазового перехода (из газа в двухфазную область, из двухфазной области в жидкость, из жидкости в двухфазную область, из двухфазной области в газ) и от типа системы (однокомпонентная или многокомпонентная). После нахождения точки фазового перехода и параметров системы в этой точке, происходит расчет оставшейся части трубы. Для местных сопротивлений точка фазового перехода не считается. Если обнаружено изменение фазового состояния, конечные параметры участка пересчитываются с учетом фазового перехода.

### Обсуждение результатов

Проанализируем влияние выбора методик расчета гидравлических потерь на потери давления в системе.

В качестве первого примера взята ветвь, состоящая из 10 последовательно соединенных 100-метровых горизонтальных участков трубы.

Дано:

Система: вода—пар

$p^* = 0,1$  МПа,  $x^* = 0,05$ ,  $D_{\text{вн}} = 301$ ,

$G = 136,63$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

Найти:  $p^n$  (обратный расчет).



Рис. 4. Алгоритм расчета участка ветви с учетом кипения или конденсации и поиском точки фазового перехода

Расчет потерь на трение проводился с использованием двух наборов правил выбора методик расчета. В первом наборе правил (*B-W*) потери на трение всегда считаются по однородной методике *Beattie-Whalley* [26]. Во втором наборе правил (*AUTO*) заложен автоматический выбор методик расчета потерь на трение на основании рекомендаций, приведенных в табл. 3.

Как видно из рис. 5, однородная методика *Beattie-Whalley* [26] при данных условиях дает более высокие потери на трение (до 5%) по сравнению с методиками, основанными на применении двухфазных мультипликаторов.

В качестве второго примера взята ветвь технологического трубопровода, в которой основные потери приходятся на местные сопротивления (рис. 6).

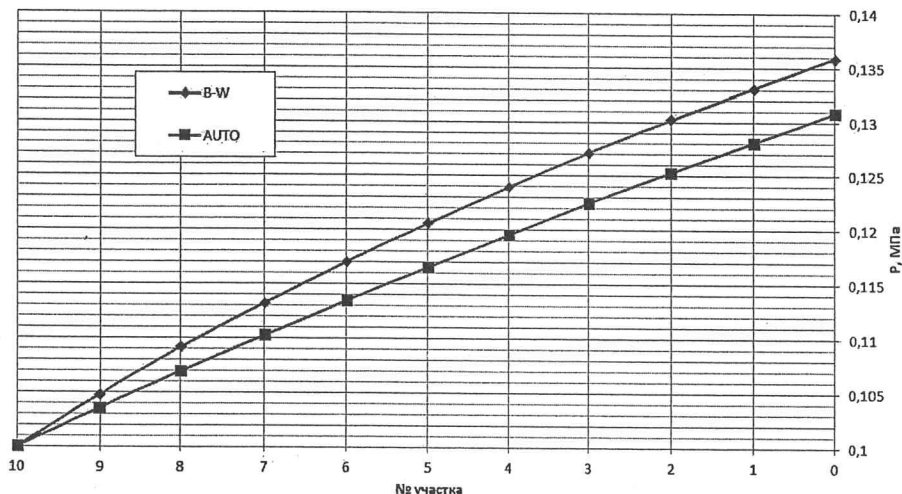


Рис. 5. Изменение давления при использовании первого (*B-W*) и второго (*AUTO*) набора правил выбора методов

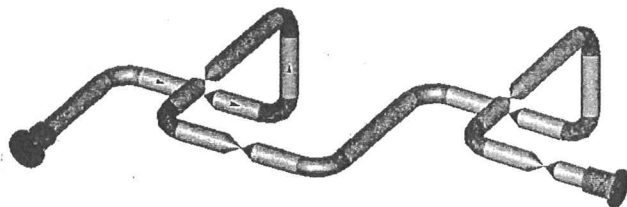


Рис. 6. Рассчитываемая ветвь трубопровода

Расчет потерь на местных сопротивлениях проводился с использованием двух наборов правил выбора методик расчета. В первом наборе правил (*HEM*) потери всегда считаются по однородной методике *HEM*. Во втором наборе правил (*AUTO*) заложен автоматический выбор методик расчета потерь на основании рекомендаций, приведенных в табл. 4.

Потери на трение в обоих правилах выбираются автоматически в соответствии с рекомендациями, приведенными в табл. 3.

Как видно из рис. 7, однородная методика *HEM* при данных условиях дает более низкие потери на местных сопротивлениях (до 9%) по сравнению с методиками, основанными на применении двухфазных мультипликаторов.

Из рассмотренных выше примеров можно сделать вывод, что выбор методик расчета может сильно влиять на результаты. Отсюда следует важность выбора наиболее подходящей при данных условиях методики расчета. Разработанный и реализо-

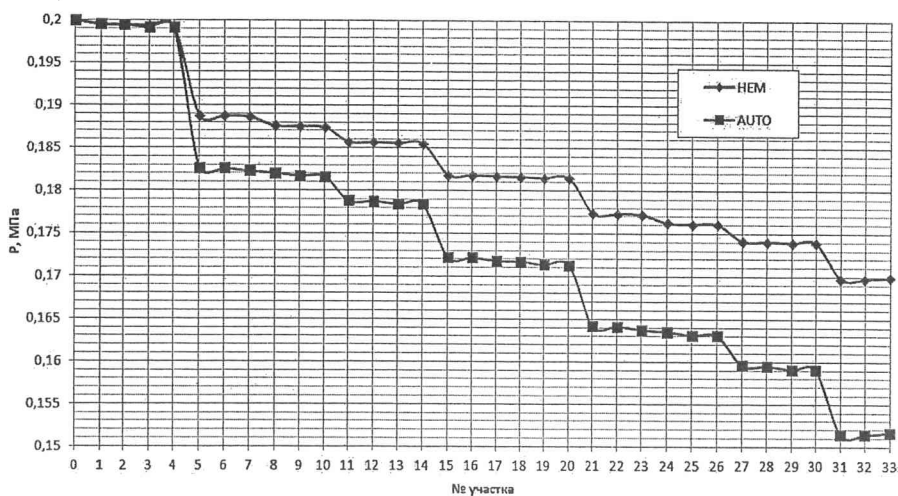


Рис. 7. Изменение давления при использовании первого (*HEM*) и второго (*AUTO*) набора правил выбора методов

ванный алгоритм расчета позволяет анализировать параметры системы и выбирать рекомендуемые при данных условиях методики расчета потерь на трение и в местных сопротивлениях. Применение подобного настраиваемого механизма автоматического выбора методик двухфазного расчета должно повысить точность производимых расчетов.

### Заключение

В статье предложена схема иерархии задач при оценочном и проектном двухфазных расчетах трубопроводных систем. Проанализированы и реализованы наиболее распространенные методики двухфазного расчета. Разработаны и реализованы алгоритмы прямого и обратного расчета ветви. Реализован алгоритм расчета участков ветви, включающий в себя настраиваемый механизм автоматического выбора методик двухфазного расчета и учет фазовых переходов. На двух модельных примерах произведен анализ чувствительности результатов к правилам выбора методик расчета и показана важность правильного выбора методик расчета.

### Условные обозначения

$p$  — давление, Па;  
 $T$  — температура, К;  
 $x$  — массовое газосодержание;  
 $\frac{dp}{dl}$  — общие потери давления на единицу длины, Па/м;  
 $\left(\frac{dp}{dl}\right)_f$  — потери давления от трения на единицу длины, Па/м;  
 $\frac{dh_m}{dl}$  — потери энтальпии смеси на единицу длины, Дж/(кг·м);  
 $dp_{local}$  — потери на местных сопротивлениях на единицу длины Па;  
 $h_m = xh_g + (1-x)h_l$  — удельная энтальпия смеси, Дж/(кг);  
 $h_g, h_l$  — удельная энтальпия газа, жидкости, Дж/(кг);  
 $\rho_{mv} = \varepsilon\rho_g + (1-\varepsilon)\rho_l$  — объемная плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_g, \rho_l$  — плотность газа, жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\varepsilon$  — объемное газосодержание;

$G = W/A$  — массовая скорость потока, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$W = W_g + W_l$  — массовый расход, кг/с;

$W_g, W_l$  — массовый расход газа, жидкости, кг/с;

$A$  — площадь поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$l$  — длина от начала трубы, м;

$R_{\Sigma}$  — суммарное термическое сопротивление теплопередачи между продуктом в трубопроводе и окружающей средой, град./Вт;

$T_{env}$  — температура окружающей среды, К;

$\theta$  — угол подъема трубы относительно горизонта, рад;

$\rho_m = x\rho_g + (1-x)\rho_l$  — удельная плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$u_m = 1/\rho_m$  — удельный объем смеси, м<sup>3</sup>/кг;

$u_g, u_l$  — удельный объем газа, жидкости, м<sup>3</sup>/кг;

$s_m$  — удельная энтропия смеси Дж/(кг·К).

### Индексы:

$n$  — значения параметров в начале участка;  
 $k$  — значения параметров в конце участка;  
 $sat$  — дифференцируемая функция берется на линии насыщения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bratland. O. Pipe Flow 2: Multi-phase Flow Assurance. 2010. P. 8.
2. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. 440 с.
3. Azzopardi B.J. Gas-liquid flows. USA. Begell House. Inc, 2006. 331 p.
4. Hewitt G.F., Roberts D.N. Studies of Two-Phase Flow Patterns by Simultaneous X-Ray and Flash Photography // Atomic Energy Research Establishment. Harwell. Report No. AERE-M 2159. 1969.
5. Baker O. Simultaneous Flow of Oil and Gas // Oil Gas J. 1954. V. 53. P. 185–190.
6. Taitel Y., Dukler A.E. A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow // AIChE Journal. 1976. V. 22. N 1. P. 47–55.
7. Barnea. D. A. Unified Model for Predicting Flow-Pattern Transitions for the Whole Range of Pipe Inclinations // Int. J. Multiphase Flow. 1987. V. 13. N 1. P. 1–12.
8. Petalas N., Aziz K. A. Mechanistic Model for Stabilized Multiphase Flow in Pipes. Technical Report for Members of the Reservoir Simulation Industrial Affiliates Program (SUPRI-B) and Horizontal Well Industrial Affiliates Program (SUPRI-HW). Stanford University. CA. 1997.
9. Chen Y. Modeling Gas-Liquid Flow in Pipes: Flow Pattern Transitions and Drift-Flux Modeling. Master of Science Degree Thesis. Stanford University. 2001.
10. Ghajar A.J., Woldesemayat M.A. Comparison of Void Fraction Correlations for Different Flow Patterns in Horizontal and

- Upward Inclined Pipes // Int. J. Multiphase Flow. 2007. V. 33. P. 347–370.
11. Zivi S.M. Estimation of Steady-State Steam Void-Fraction by Means of the Principle of Minimum Entropy Generation // J. Heat Transfer. 1964. V. 86. P. 247–252.
  12. Fauske H. Critical Two-Phase, Steam-Water Flows // In: Proc. Of Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute. 1961. Stanford University Press. Stanford, CA. P. 79–89.
  13. Thom J.R.S. Prediction of Pressure Drop during Forced Circulation Boiling of Water // Int. J. Heat Mass Transfer. 1964. V. 7. P. 709–724.
  14. Baroczy C.J. A systemic correlation for two phase pressure drop. 1966. Chem. Eng. Progr. Symp. Ser. 62. P. 232–249.
  15. Turner J.M., Wallis G.B. The separate-cylinders model of two-phase flow. Paper N. NYO-3114–6 // Thayer's School Eng. Dartmouth College. Hanover, NH. USA. 1965.
  16. Lockhart R.W., Martinelli R.C. Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two Component Flow in Pipes // Chem. Eng. Progr. 1949/V. 45. P. 39–48.
  17. Чисхолм, Д. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках // Пер. с англ. М.: Недра. 1986. 204 с.
  18. Smith S.L. Void Fractions in Two phase Flow: a Correlation based upon an Equal Velocity Head Model // Proc. Inst. Mech. Engrs. 1969. V. 184. N 36. P. 647–657.
  19. Premoli A., Francesco D., Prima A. An Empirical Correlation for Evaluating Two-Phase Mixture Density under Adiabatic Conditions. Paper B9 // In: European Two-Phase Flow Group Meeting, Milano Italy. 1970.
  20. Zuber N., Findlay J.A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems // J. Heat Transfer. 1965, V. 87. P. 435–468.
  21. Rouhani S.Z., Axelsson E. Calculation of void volume fraction in the sub cooled and quality boiling regions // Int. J. Heat Mass Transfer. 1970. V. 13. P. 383–393.
  22. Rouhani S.Z. Modified Correlations for Void and Two-Phase Pressure Drop. AE-RTV–851. 1969.
  23. Steiner D., Heat Transfer to Boiling Saturated Liquids // in: VDI-Wärmeatlas (VDI Heat Atlas). Chapter Hbb. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GCV), Dusseldorf, 1993.
  24. Dix G.E. Vapor Void Fraction for Forced Convection with Boiling and Low Flow Rates // PhD Thesis/Univ. of California/Berkeley/1971.
  25. Goda H., Hibiki T. et al. Drift-Flux Model for Downward Two-Phase Flow // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 4835–4844.
  26. Whalley P.B. Boiling, Condensation and Gas-Liquid Flow // Clarendon Press. Oxford. 1987.
  27. IHS ESDU 01014. Frictional Pressure Gradient in Adiabatic Flows of Gas-Liquid Mixtures in Horizontal Pipes: Prediction Using Empirical Correlations and Database. 2002.
  28. Beattie D.R. H., Whalley P.B. A Simple Two-Phase Frictional Pressure Drop Calculation Method // Int. J. Multiphase Flow. 1982. V. 8. N 1. P. 83–87.
  29. Shannak B.A. Frictional Pressure Drop of Gas Liquid Two-Phase Flow in Pipes // Nuclear Engineering and Design. 2008. V. 238. P. 3277–3284.
  30. 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.
  31. Muller-Steinhagen H., Heck K. A Simple Pressure Drop Correlation for Two-Phase Flow in Pipes // Chem. Eng. Process. 1986. V. 20. P. 297–308.
  32. Simpson H.C., Rooney D.H., Grattan E. Two-Phase Flow through Gate Valves and Orifice Plates. Paper E2 // International Conference Physical Modelling of Multi-phase Flow. Coventry. England. 1983.
  33. Morris S.D. Two-phase Pressure Drop across Valves and Orifice Plates. Paper E2. European Two-phase Flow Group Meeting. Marchwood Engng Lab., Marchwood, Southampton. England. 1985.
  34. СП 41-103-2000.
  35. Юдовина Е.Ф., Бабенко А.В. Автоматизация выбора методик двухфазного расчета // CADmaster 2011. № 3. С. 82.
  36. Бабенко А.В., Корельштейн Л.Б. Несправедливо забытый Pegasus, или чему не учат в вузах // CADmaster 2011. № 3. С. 84–85.
  37. Миркин А.З., Усинь В.В. Трубопроводные системы. Справочное издание. М.: Химия, 1991. 256 с.
  38. СТО Газпром 2–3.5-051-2006.
  39. Ghajar A.J. Non-Boiling Heat Transfer in Gas-Liquid Flow in Pipes — a Tutorial // J. of Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng. 2005. V. XXVII. P. 46–73.

### ПАМЯТКА АВТОРУ (продолжение)

7. Графический материал предоставляется в виде оригиналов только в черно-белом изображении. Он должен быть четким и не требовать перерисовки.
8. Каждый рисунок распечатывается на отдельной странице, внизу которой указываются его порядковый номер, автор и название статьи.
9. Таблицы должны иметь названия, их следует прилагать после статьи каждую на отдельной странице
10. К статье следует приложить диск с файлами: текста статьи, таблиц, подписей к рисункам и самих рисунков (изображение выполняется в форматах *jpeg* или *tiff* с разрешением не менее *300 dpi*), аннотации статьи на русском языке, аннотации с названием статьи и фамилиями авторов на английском языке, сведений об авторах.
11. В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), адрес с указанием почтового индекса и контактный телефон (с кодом города), E-Mail.
12. По желанию авторов в статье могут быть опубликованы их фотографии.

**Плата за публикацию статей с авторов, в том числе с аспирантов, не взимается**

Статью направлять в адрес редакции: 105425, Москва, Сиреневый б-р, д. 14, корп. 1; e-mail: admin@nait.ru; тел.: 8 (499) 164-47-74. Журнал Химическая технология.