

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА НА КОЭФФИЦИЕНТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Дихтярь Т.В., Зайцев О.Н., Дихтярь К.С., Ангелюк И.П.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»
г. Симферополь, ул. Киевская, 181.
E-mail: ta_titova@mail.ru

Аннотация: Во время движения по замкнутому контуру рабочему потоку приходится преодолевать определённое гидравлическое сопротивление. Любая трубопроводная коммуникация имеет не только прямолинейные участки, но и повороты, ответвления, для создания которых используются различные фитинги. А для регулирования потока рабочей среды устанавливается запорная арматура. Всё это создаёт сопротивление, поэтому очень важно перед тем, как приступать к монтажу трубопровода, выполнить ряд расчётов, в том числе определить гидравлическое сопротивление. Это позволит в будущем сократить теплотери и, соответственно, избежать лишних энергозатрат.

Предмет исследования: разработка методологии уточненного определения коэффициентов гидравлического сопротивления для различных режимов движения газожидкостной смеси с дифференциацией по технологическим устройствам.

Материалы и методы. Методом исследований является анализ литературных данных, проведение необходимых расчётов с последующим математическим способом получения зависимостей для коэффициента гидравлического сопротивления. Результаты. Показано, что для расслоенной структуры течения смеси с гладкой поверхностью раздела коэффициенты гидравлического сопротивления обеих фаз могут быть представлены в функции числа Рейнольдса, выраженного через гидравлический диаметр соответствующей фазы и относительной шероховатости.

Выводы. Разработана методология уточненного определения коэффициентов гидравлического сопротивления для различных режимов движения газожидкостной смеси с дифференциацией по технологическим устройствам.

Ключевые слова: Структура течения, коэффициент гидравлического сопротивления, кинематическая вязкость, коэффициент шероховатости, критерий Рейнольдса, потери напора, коэффициент сопротивления.

ВВЕДЕНИЕ

Со сменой форм течения (переход пробковой в расслоенную) резко меняются закономерности изменения истинного газосодержания, амплитуды пульсаций давления, градиента давления и другие характеристики потока[1].

Связь перечисленных характеристик потока со структурой течения, естественно, должна оказывать влияние и на общий вид зависимости $\lambda_{см} = \lambda(\beta)$, которая также будет меняться со сменой структуры потока[1].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Коэффициент гидравлического сопротивления при тении однородной жидкости определяется по формуле[2]:

$$\lambda_0 = 0,067 \left(\frac{158}{Re_{см}} + \frac{2k_3}{d} \right)^{0,2}, \quad (1)$$

где k_3 – эквивалентная шероховатость трубы;

d - внутренний диаметр трубы, м.

$$Re_{см} = \frac{w_{см}d}{\nu_{см}}, \quad (2)$$

где $\nu_{см}$ – кинематическая вязкость газожидкостной смеси, м²/с;

$w_{см}$ – скорость потока газожидкостной смеси в расчетном сечении, м/с.

Для кольцевого режима вязкость смеси принимается равной вязкости жидкости $\nu_{см} = \nu_{ж}$.

Для пробкового режима[2]:

$$\nu_{см} = \frac{1}{\frac{\beta_{ж}}{\nu_{ж}} + \frac{\beta_{г}}{\nu_{г}}}, \quad (3)$$

где $\nu_{ж}$ и $\nu_{г}$ – соответственно кинематические вязкости жидкости и газа, м²/с;

$\beta_{ж}$ – расходная объемная доля жидкости в смеси;

$\beta_{г}$ – объемное расходное газосодержание.

Выразим $\beta_{ж}$ через $\beta_{г}$.

Объемное расходное газосодержание определяется по формуле [3]:

$$\beta_{г} = \frac{Q_{г}}{Q_{см}}, \quad (4)$$

где $Q_{г}$ – объемный расход газа, м³/с;

$Q_{см}$ – объемный расход смеси, м³/с,

тогда расходная объемная доля жидкости в смеси

$$\beta_{ж} = \frac{Q_{ж}}{Q_{см}}, \quad (5)$$

где $Q_{ж}$ – объемный расход жидкости, м³/с.

Отношение объемных расходов равно[3]:

$$\frac{Q_{г}}{Q_{ж}} = \frac{\beta_{г}}{1-\beta_{г}}, \quad (6)$$

отсюда

$$\beta_{ж} = \frac{Q_{г}(1-\beta_{г})}{Q_{см}\beta_{г}}. \quad (7)$$

Подставляя формулу (4) в формулу (7), получим[4]

$$\beta_{ж} = 1 - \beta_{г}. \quad (8)$$

С учетом формулы (8) получим

$$\nu_{см} = \frac{1}{\frac{1-\beta_{г}}{\nu_{ж}} + \frac{\beta_{г}}{\nu_{г}}}. \quad (9)$$

Таким образом, выражение для определения критерия Рейнольдса для газожидкостной смеси имеет вид

$$Re_{см} = \frac{Q_{см}v}{86400 \cdot 0,785d \frac{1}{\frac{1-\beta_{\Gamma}}{v_{ж}} + \frac{\beta_{\Gamma}}{v_{\Gamma}}}}$$

Окончательно получим

$$Re_{см} = \frac{Q_{см}v[(1-\beta_{\Gamma})v_{\Gamma} + \beta_{\Gamma}v_{ж}]}{86400 \cdot 0,785d v_{ж}v_{\Gamma}} \quad (10)$$

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью статьи является разработка методологии уточненного определения коэффициентов гидравлического сопротивления для различных режимов движения газожидкостной смеси с дифференциацией по технологическим устройствам.

Методом исследований является анализ литературных данных с последующим математическим способом получения зависимости для коэффициента часового максимума при числе жителей, менее тысячи человек.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Методом исследований является анализ литературных данных, проведение необходимых расчётов с последующим математическим способом получения зависимостей для коэффициента гидравлического сопротивления.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Диффузор

При течении в диффузоре скорость уменьшается, давление вниз по потоку соответственно увеличивается, происходит преобразование кинетической энергии в энергию давления. Частицы двигающейся жидкости преодолевают нарастающее давление за счет кинетической энергии. Кинетическая энергия убывает вдоль оси диффузора и, что важно, от оси к стенкам. Слои жидкости вдоль стенки обладают такой малой кинетической энергией, что порой не в состоянии преодолеть встречное повышенное давление – они останавливаются или даже начинают двигаться обратно. Это вызывает противоток, вихреобразование и даже отрыв потока. Интенсивность этих процессов возрастает с увеличением угла расширения диффузора (угла α), следовательно. При увеличении угла расширения диффузора растут потери на вихреобразование[5].

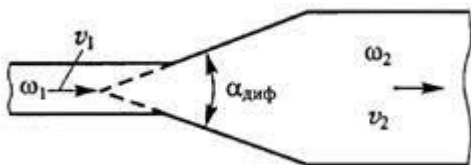


Рис. 3.2. Постепенное расширение трубопровода [5].

Кроме того, в диффузоре имеются обычные потери на трение, подобные тем, что возникают в трубах постоянного сечения[5].

Поэтому полная потеря напора в диффузоре определяется по формуле, м [5]

$$h_{ном} = h_{тр} + h_{расш} = \xi_{диф} \frac{v_1^2}{2g},$$

где $h_{тр}$ - потеря напора на трение, м;

$h_{расш}$ - потери напора на расширение в диффузоре, м;

$\xi_{диф}$ - коэффициент сопротивления диффузора;

v_1 – скорость в начале диффузора, м/с.

Потеря напора на трение[5]

$$h_{тр} = \frac{\lambda}{8 \sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v_1^2}{2g}, \quad (11)$$

отсюда

$$\lambda = \frac{8 \sin(\alpha/2) h_{тр}}{\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v_1^2}{2g}}, \quad (12)$$

где $n = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$ – степень расширения диффузора (r_1 и r_2 – соответственно, радиус трубы в начале и в конце диффузора).

Потери напора на расширение (вихреобразование) имеют в диффузоре ту же природу, что и в трубопроводе с внезапным расширением сечения, но по сравнению с внезапным расширением они меньше. Обычно вводят поправочный коэффициент смягчения, так как в диффузоре по сравнению с внезапным расширением торможение как бы смягченное[5].

$$h_{расш} = k \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v_1^2}{2g}, \quad (13)$$

где k – коэффициент смягчения: для углов конусности диффузора $\alpha=5-20^\circ$ значение k принимают приблизительно $k = \sin \alpha$.

Таким образом, окончательно получим

$$\lambda = \frac{8 \sin(\alpha/2) \left[\xi_{диф} - \sin \alpha \left(1 - \frac{r_1^4}{r_2^4}\right) \right]}{1 - \frac{r_1^4}{r_2^4}} \quad (14)$$

Внезапное расширение

При внезапном расширении трубопровода поток срывается с угла и расширяется не внезапно, как сама труба, а постепенно. Причем в кольцевом пространстве между потоком и стенкой образуются вихри[5]. Которые и являются причиной потерь энергии, т.е. возникновение сопротивления[5]. (рис. 3.3).

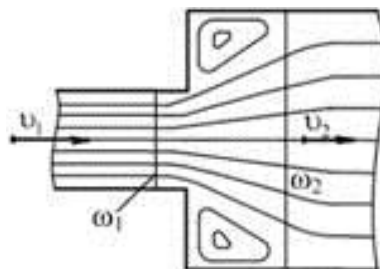


Рис. 3.3. Внезапное расширение трубопровода[5].

Потери напора на расширение [5]

$$h_{расш} = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v_1^2}{2g} \quad (15)$$

Тогда

$$\lambda = \frac{8\sin(\alpha/2) \left[\xi_{расш} - \left(1 - \frac{r_1^4}{r_2^4}\right) \right]}{1 - \frac{r_1^4}{r_2^4}} \quad (16)$$

где $\xi_{расш}$ – коэффициент сопротивления при внезапном расширении.

Конфузор

В конфузоре течение жидкости происходит при увеличении скорости и падения давления вниз по потоку. Поэтому причин для вихреобразования и срыва потока (как в диффузоре) нет. В конфузоре есть лишь потери на трение, следовательно, сопротивление его всегда меньше, чем у диффузора[6].

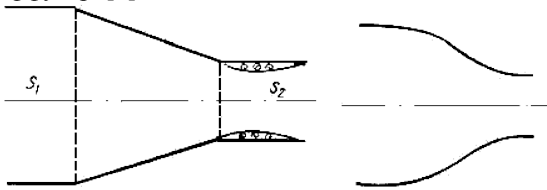


Рис. 3.4. Постепенное сужение трубопровода[6].

Коэффициент потерь напора в конфузоре определяется по формуле [6]:

$$\xi_{конф} = \frac{\lambda}{8\sin\alpha} \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right), \quad (17)$$

где ω_1 и ω_2 – площадь живого сечения соответственно на входе и на выходе из конфузора.

Тогда

$$\lambda = \frac{\xi_{конф} \cdot 8\sin\alpha}{1 - \frac{r_2^2}{r_1^2}} \quad (18)$$

Небольшие вихреобразования и отрыв потока от стенки с одновременным сжатием потока могут возникнуть лишь на выходе из конфузора в месте соединения конической части с цилиндрической.

Внезапное сужение

Внезапное сужение вызывает меньшую потерю энергии, чем внезапное расширение с таким же соотношением площадей. Потери при этом обусловлены трением потока при входе в более узкую трубу и потерями на вихреобразование[5].

Вихри образуются потому, что поток не обтекает входной угол, а срывается с него и сужается. Кольцевое пространство вокруг суженной части заполняется завихренной жидкостью[5].

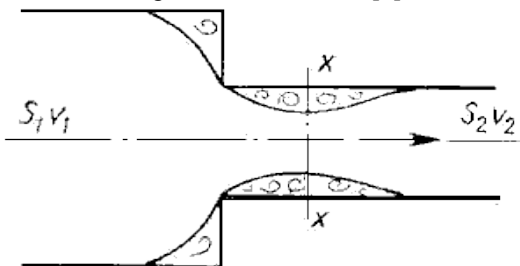


Рис. 3.5. Внезапное сужение трубопровода

Полная потеря напора при внезапном сужении, м [5]

$$h_{ном} = h_{мп} + h_{суж} = \xi_{суж} \frac{v_2^2}{2g},$$

где $\xi_{суж}$ – коэффициент сопротивления при внезапном сужении трубопровода.

Потери напора при внезапном сужении определяются по формуле [5]:

$$h_{суж} = \frac{1 - \frac{1}{n}}{2} \cdot \frac{v_2^2}{2g}, \quad (19)$$

где $n = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$ – коэффициент сжатия струи [7].

Потеря напора на трение[7].

$$h_{мп} = \frac{\lambda}{8\sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v_2^2}{2g}, \quad (20)$$

отсюда

$$\lambda = \frac{8\sin(\alpha/2)h_{мп}}{\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v_2^2}{2g}} \quad (21)$$

Таким образом, окончательно получим

$$\lambda = \frac{8\sin(\alpha/2) \left(\xi_{суж} \frac{1}{2} + \frac{r_1^4}{2r_2^2} \right)}{1 - \frac{r_1^4}{r_2^2}} \quad (22)$$

Плавный поворот трубы (отвод)

Ориентация трубопровода в пространстве оказывает весьма существенное влияние на закономерности изменения истинного газосодержания из-за влияния угла наклона трубы на структуру течения смеси. Со сменой структур течения смеси меняются закономерности изменения истинного газосодержания, что в свою очередь может повлиять на коэффициент гидравлического сопротивления[1]. В пределах существования пробковой структуры течения смеси ориентация трубопровода в пространстве не оказывает заметного влияния на коэффициент гидравлического сопротивления. Однако область применимости закономерностей изменения коэффициента гидравлического сопротивления, установленная для пробковой структуры течения смеси в горизонтальном трубопроводе, существенно зависит от угла наклона[1].

Плавность поворота значительно уменьшает интенсивность вихреобразования, а следовательно, и сопротивление отвода по сравнению с коленом. Это уменьшение тем больше, чем относительный радиус кривизны отвода R/d, и при достаточно большом его значении срыв потока и связанное с ним вихреобразование устраняется полностью[1].

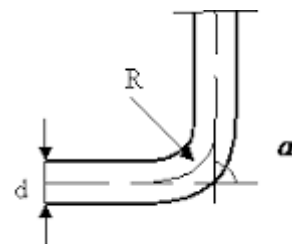


Рис. 3.6. Плавный поворот трубы[7]

Коэффициент сопротивления определяется по формуле[7]:

$$\xi_{\alpha} = \xi_{90^{\circ}} \cdot a, \quad (23)$$

где a – параметр, зависящий от центрального угла поворота трубы (табл. 1).

Таблица 1. Значение a в зависимости от центрального угла поворота трубы α [7]

α , град	20	30	40	50	60	70
	0,4	0,55	0,65	0,75	0,83	0,88

Коэффициент $\xi_{90^{\circ}}$ определяется по формуле А.Д. Альтшуля [8]:

$$\xi_{90^{\circ}} = [0,2 + 0,001(100\lambda)^8] \sqrt{d/R}. \quad (24)$$

Отсюда

$$\lambda = \sqrt[8]{\frac{\xi_{90^{\circ}}}{10^{13} \sqrt{d/R}} - 2 \cdot 10^{-14}}. \quad (25)$$

С учетом формулы (18) окончательно получим

$$\lambda = \frac{1}{100} \cdot \sqrt[8]{\frac{\xi_{\alpha} \cdot 10^3}{\alpha \sqrt{d/R}} - 200}. \quad (26)$$

Резкий поворот трубы (колена)

Колено вызывает значительные потери энергии, так как происходят отрывы потока и вихреобразование, причем эти потери тем больше, чем больше угол поворота колена δ [7].

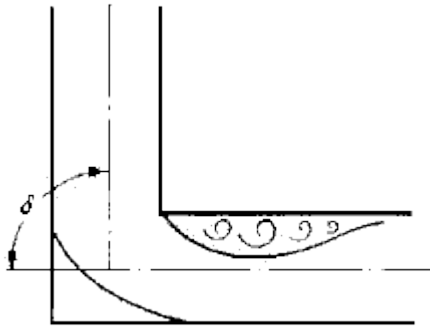


Рис. 3.7. Резкий поворот трубопровода[7]

Коэффициент сопротивления можно найти по формуле[7]:

$$\xi_{\alpha} = \xi_{90^{\circ}} (1 - \cos\delta). \quad (27)$$

Тогда, с учетом формулы (20), получим

$$\lambda = \frac{1}{100} \cdot \sqrt[8]{\frac{\xi_{\alpha} \cdot 10^3}{(1 - \cos\delta) \sqrt{d/R}} - 200}. \quad (28)$$

Запорные устройства

Причиной возникновения потерь напора в местных сопротивлениях являются деформации потока и вихреобразование. Запорные устройства служат для полного перекрытия трубопроводов, а в некоторых случаях и для регулирования расхода протекающей жидкости[9].

Полная потеря напора, m [5]

$$h_{пот} = h_{мп} + h_{зан} = \xi_{зан} \frac{v^2}{2g},$$

где $\xi_{зан}$ - коэффициент сопротивления для запорного устройства.

Потери напора для запорного устройства определяются по формуле [7]:

$$h_{зан} = \left(\frac{\omega}{\omega_o \varepsilon} - 1 \right)^2 \frac{v^2}{2g}, \quad (29)$$

где ω_o – площадь сечения, не стесненная запорным приспособлением;

ω – площадь сечения трубы;

$\varepsilon = \frac{\omega_o}{\omega}$ – коэффициент сжатия струи [7].

Потеря напора на трение[7]

$$h_{мп} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (30)$$

отсюда

$$\lambda = \frac{h_{мп}}{\frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}}. \quad (31)$$

Таким образом, окончательно получим

$$\lambda = \frac{\xi_{зан} - \left(\frac{\omega^2}{\omega_o^2} - 1 \right)^2}{l/d}. \quad (32)$$

Смена структур течения смеси при прочих равных условиях приводит к изменению функциональной связи между коэффициентом сопротивления и определяющими критериями[1]. С гидравлической точки зрения движение жидкостной фазы смеси при расслоенной структуре течения можно рассматривать как некоторый аналог безнапорного режима течения жидкости в наклонной трубе. Следовательно, исследование закономерностей изменения коэффициента гидравлического сопротивления можно свести к установлению зависимости[1]:

$$\lambda_{см} = f(Re, \varepsilon),$$

где ε – относительная шероховатость трубы.

Для безнапорного течения жидкости с поверхностью раздела в гладких трубах коэффициент гидравлического сопротивления является функцией числа Re , в котором в качестве линейного размера используется гидравлический диаметр (отношение площади сечения к смоченному жидкостью периметру трубы), т.е.[1]

$$Re = \frac{\pi w \varphi}{v \theta},$$

где φ – истинное объемное газосодержание;

θ – смоченный периметр.

При аналогичном течении жидкости в шероховатых трубах коэффициент гидравлического сопротивления определяется не только значением числа Рейнольдса, но и относительной шероховатостью труб [1]

$$\varepsilon = \frac{k_2}{d}.$$

Относительная шероховатость меняется в очень широких пределах даже для одного и того же трубопровода в результате изменения гидравлического диаметра. Поэтому влияние его на коэффициент сопротивления при определенных условиях становится весьма существенным[1].

Для расслоенной структуры течения смеси с гладкой поверхностью раздела коэффициенты гидравлического сопротивления обеих фаз могут быть представлены в функции числа Рейнольдса, выраженного через гидравлический диаметр соответствующей фазы и относительной шероховатости.

ВЫВОДЫ

Разработана методология уточненного определения коэффициентов гидравлического сопротивления для различных режимов движения газожидкостной смеси с дифференциацией по технологическим устройствам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чирков Ю.Г. Любимое дитя электрохимии / Чирков Ю.Г. – М.: Знание, 1985 – 176с.
2. Арманд А.А. Исследование механизма движения двухфазной смеси. Сб. "Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления". Изд. АН СССР, 1955 - 256с.

3. Мамаев В.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах / В.А. Мамаев, Г.Э. Одишария, Н.И. Семенов, А.А. Точигин. М.: Недра, 1968. – 208с.

4. Б.Т. Муллаев Проектирование и оптимизация технологических процессов в добыче нефти. Том 1. – Издательский союз Андронум, 2016. – 534с.

5. Калашников О.В. Расчетные и действительные перепады давления при двухфазном транспорте нефти и газа // Институт газа НАН Украины, Киев Экотехнологии и ресурсосбережение, 2001, №1, С. 9-13

6. Моргунов К.П. Гидравлика: Учебник. – СПб.: Лань, 2014. – 288 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература)

7. Потери напора на местных гидравлических сопротивлениях. Электронный ресурс <http://firing-hydra.ru/index.php?request=full&id=98>

8. Брюханов О.Н., Коробко В.И., Мелик-Аракелян А.Т. Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 254 с. – (Среднее профессиональное образование)

9. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика: Учебн. пос. для вузов. – М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE FLOW STRUCTURE ON THE COEFFICIENT OF HYDRAULIC RESISTANCE

Dikhtyar T.V., Zaitsev O.N., Dikhtyar K.S., Ангелюк I.P.

Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, 295007, Simferopol, Prospect Academic Vernadsky 4, Russia

Annotation. During the movement along a closed circuit, the working flow has to overcome a certain hydraulic resistance. Any pipeline communication has not only straight sections, but also turns, branches, for the creation of which various fittings are used. And shut-off valves are installed to regulate the flow of the working medium. All this creates resistance, so it is very important to perform a number of calculations before starting the installation of the pipeline, including determining the hydraulic resistance. This will allow to reduce heat loss in the future and, accordingly, avoid unnecessary energy consumption.

Subject of research: development of a methodology for the improved determination of hydraulic resistance coefficients for various modes of movement of a gas-liquid mixture with differentiation by technological devices.

Materials and methods. The research method is the analysis of literature data, carrying out the necessary calculations, followed by a mathematical method for obtaining dependencies for the coefficient of hydraulic resistance.

Results. It is shown that for a layered structure of a mixture flow with a smooth interface, the hydraulic resistance coefficients of both phases can be represented as a function of the Reynolds number, expressed in terms of the hydraulic diameter of the corresponding phase and relative roughness.

Conclusions. A methodology has been developed for the improved determination of hydraulic resistance coefficients for various modes of movement of a gas-liquid mixture with differentiation by technological devices.

Key words. Flow structure, hydraulic resistance coefficient, kinematic viscosity, roughness coefficient, Reynolds criterion, pressure loss, resistance coefficient.