Научная статья
УДК 621.671+51-74

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРОВ ТРУБОПРОВОДА С ВЕТВЛЕНИЕМ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ СРЕД С ВЫСОКОЙ ВЯЗКОСТЬЮ

В.А. Наумов[1,*]

[1] Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия
[*] E-mail: van-old@mail.ru

Аннотация. Метод определения отношения диаметров ветвей трубопровода при подаче неньютоновских пищевых сред с высокой вязкостью представлен в статье. Алгебраическое уравнение для определения указанного отношения получено в безразмерной форме. Числами подобия задачи являются: отношение расходов пищевой среды в ветвях; отношение длин труб в ветвях; безразмерный индекс течения; безразмерный комплекс, прямо пропорциональный разности приведенных статических давлений в емкостях и обратно пропорциональный коэффициенту консистенции жидкости; безразмерные показатели местных гидравлических сопротивлений в ветвях. Названное алгебраическое уравнение было решено численным методом. Что позволило изучить влияние чисел подобия на отношение диаметров. Отношение диаметров можно найти аналитически в частном случае.

Ключевые слова: *технологический трубопровод; ветвление; отношение диаметров; пищевые среды; модель степенной жидкости.*

Для цитирования: Наумов В.А. Определение диаметров трубопровода с ветвлением для транспортирования пищевых сред с высокой вязкостью // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2025. Т. 11. № 4. С. 56–65.

Original article

DETERMINATION THE BRANCHED PIPELINE DIAMETERS FOR THE TRANSPORTATION OF FOOD MEDIA WITH HIGH VISCOSITY

V.A. Naumov [1,*]

[1] Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia
[*] E-mail: van-old@mail.ru

Abstract. The method for determining the ratio of the pipeline branches diameters when feeding non-Newtonian food media with high viscosity is presented in the article. The algebraic equation for determining the specified ratio is obtained in dimensionless form. The similarity numbers of the problem are: the ratio of the consumption of the food medium in the branches; the ratio of the lengths of pipes in the branches; the dimensionless flow index; a dimensionless complex directly proportional to the difference of the reduced static pressures in the tanks and inversely proportional to the coefficient of consistency of the liquid; dimensionless indicators of local hydraulic resistances in branches. The named algebraic equation was solved numerically. This allowed us to study the effect of similarity numbers on the ratio of diameters. The ratio of diameters can be found analytically in the special case.

Keywords: *process pipeline; branching; diameter ratio; food media; power fluid model.*

© Наумов В.А. 2025

For citation: Naumov V.A. Determination the branched pipeline diameters for the transportation of food media with high viscosity. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 4, pp. 56–65.

Введение

Трубопроводный транспорт имеет самое широкое распространение. Длина трубопровода может различаться от нескольких метров на малых предприятиях до сотен километров у транснациональных нефтепроводов и газопроводов. Трубопроводы во многих случаях имеют ветвления. Основные принципы гидравлического расчета таких течений хорошо известны (см., например, [1, 2]). Исследованию различных проблем, связанных с течениями в трубопроводах с ветвлениями, посвящено большое количество современных научных публикаций. Так в [3] было исследовано интересное явление – акустический резонанс в течении с боковым ответвлением (полостной звук). Такое явление может возникать в ответвлениях труб, ведущих к предохранительным или перепускным клапанам котла. Был использован метод визуализации с высоким временным разрешением. Скорости в воздушном потоке, содержащем масляный туман в качестве индикаторных частиц, измерялись с помощью высокочастотного импульсного лазера и высокоскоростной камеры. Было установлено, что потоки жидкости в разных точках полости взаимодействуют, причем между ними существуют некоторые фазовые различия.

Особенности применения системы Matlab/SimHydraulics в задаче построения моделей магистральных трубопроводов были рассмотрены в [4]. Специальный блок T-junction позволяет учесть ветвление трубопровода, но для его применения необходимо задать внутренний диаметр основной трубы d_0 и диаметр ответвления d_1. Указанный блок дает возможность внести ограничения расчетного расхода транспортируемой жидкости.

Моделирование нестационарных течений в разветвленных трубопроводных системах, в том числе гидроудара, было рассмотрено в [5-7]. В [7] было предложено использовать для исследования таких систем графики с древовидной структурой. В изотермическом приближении движение жидкости в трубе с изменяющимся за счет упругой деформации сечением описывается системой следующих уравнений для одномерного нестационарного изотермического потока: уравнение неразрывности, уравнение сохранения импульса, уравнение связи давления и плотности (уравнение состояния). При наличии ветвления система уравнений записывается для каждого участка с учетом граничных условий между ними. Такая дифференциальная математическая модель учитывает следующие факторы: нестационарность процесса, деформацию трубопровода, конвективное движение жидкости, распространение волн давления, потери энергии из-за трения, действие на поток силы тяжести.

В [8] работе приведены результаты численного исследования внутреннего трехмерного течения в трубопроводе с ветвлением Т-образного типа. Рассмотрена гидравлическая система, в которой один насос предназначен для подачи воды в два отдельных сельскохозяйственных резервуара. Сначала было проверено горизонтальное расположение труб, при котором скорость потока на выходе должна составлять половину скорости притока. Чтобы гарантировать сбалансированную подачу предложено использование ответвлений меньшего диаметра, чем на основной трубе. Для моделирования вязкого течения несжимаемой жидкости использовалась RANS-программа для трехмерных нестационарных течений.

Математические модели для решения задачи о стационарном сжимаемом (дозвуковом) течении газа в разветвлениях трубопроводов, Y-образных тройниках предложены в [9-11]. Они могут быть использованы для независимой верификации с другими математическими моделями. В [12] была предложена система дифференциальных уравнений, описывающая изменения давления и температуры стационарного потока на

прямых, поворотных и разветвленных участках трубопровода. Была разработана компьютерная программа, использующая предложенную систему уравнений, которая проводит гидравлические и тепловые расчеты. Ключевой особенностью программы является возможность решения различных задач, таких как: потери давления на трение по длине трубопровода; потери давления в местных сопротивлениях; отвод тепла в окружающую среду; распределение потока.

Заметим, программа [12] позволяет подбирать диаметр различных трубопроводных систем, но лишь на основе решения системы дифференциальных уравнений. В [13] был предложен инженерный метод определения диаметров трубопроводной системы при течении ньютоновской жидкости в турбулентном режиме. В общем случае необходимо решить алгебраическое уравнение численным методом. Для некоторых частных случаев (квадратичная область гидравлического сопротивления, одинаковые конечные напоры в ветвях) в [13] удалось получить аналитическое решение. В пищевой промышленности нередко используются особо вязкие среды, например, мясной фарш. Режим их течения является ламинарным, а реологические свойства отличны от свойств ньютоновских жидкостей

Цель данной статьи – обобщить метод [13] расчета диаметров трубопровода с ветвлением на случай транспортирования неньютоновских пищевых сред с высокой вязкостью и с его помощью оценить влияние различных факторов на эти диаметры.

Материалы и методы

Рассмотрим технологический трубопровод с ветвлением для транспортирования пищевых сред с большой вязкостью, схема которого представлена на рис. 1

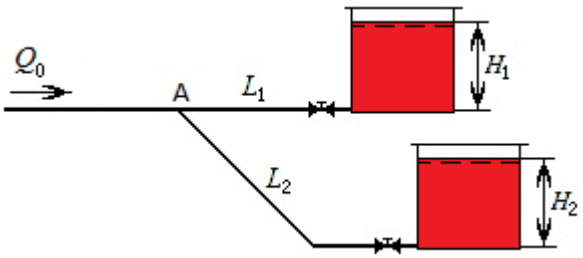


Рисунок 1 – Схема технологического трубопровода с ветвлением

Пищевая среда с объемным расходом Q_0 (м^3/с) транспортируется по главной трубе диаметром d_0 до узла A. Пищевую среду считаем несжимаемой с плотностью ρ (кг/м^3). В узле A происходит разделение трубопровода на две ветви. Длина первой ветви – L_1 (м), диаметр – d_1 (м), второй ветви, соответственно, L_2 и d_2. Расход жидкости в ветвях обозначим Q_1 и Q_2. Для них должно выполняться очевидное равенство:

$$Q_1 + Q_2 = Q_0. \quad (1)$$

Емкости, в которые поступает пищевая среда, закрытые. В первой емкости глубина слоя – H_1 (м), абсолютное давление P_1 (Па), во второй емкости, соответственно, H_2 и P_2. Необходимо найти отношение $\delta = d_2/d_1$, при котором будет выполнено заданное распределение расходов пищевой среды по ветвям Q_1 и Q_2.

В качестве пищевой среды будем рассматривать неньютоновские жидкости, реологические свойства которых описываются моделью степенной жидкости:

$$\tau = K \cdot \omega^m, \quad (2)$$

где τ – касательное напряжение, Па; m – безразмерный индекс течения; K – коэффициент консистенции жидкости, Па·с^m; ω – сдвиг скорости, с$^{-1}$.

В частности, моделью степенной жидкости хорошо описываются реологические свойства плавленого сыра (ПС) и мясного фарша (МФ). В табл. 1 представлены реологические параметры образцов указанных субстанций, которые будут использованы в дальнейших расчетах. Заметим, МФ имеет эффективную вязкость гораздо выше, чем ПС.

Таблица 1 – Реологические параметры образцов ПС и МФ

Пищевая субстанция	Обозначение	Источник	m	K, Па·с^m
ПС (состав 1 при 85°С)*	ПС-1	[14]	0,863	0,412
ПС (состав 2 при 85°С)**	ПС-2	[14]	0,692	1,554
Куриный фарш	МФ-1	[15]	0,209	250,6
Смесь из куриного, говяжьего и свиного фарша	МФ-2	[15]	0,180	769,5

*Состав 1: сыр «Гауда» – 50,5%, вода – 37,5%; молочный порошок – 9%, соль-плавитель – 3%.

**Состав 2: сыр «Гауда» – 43%; вода – 24,5%; масло сливочное – 27%, молочный порошок – 2,5%, соль-плавитель – 3%.

Как в [13], запишем давление в узле A в гидравлическом приближении:

$$P_A = 0{,}5\rho\,(\lambda_1 L_1/d_1 + \zeta_1)\,W_1^2 + \rho g H_1 + P_1 = 0{,}5\rho\,(\lambda_2 L_2/d_2 + \zeta_2)\,W_2^2 + \rho g H_2 + P_2, \quad (3)$$

где $W_1 = 4\cdot Q_1/(\pi d_1^2)$, $W_2 = 4\cdot Q_2/(\pi d_2^2)$ – средние (по расходу) скорости среды в 1-й и 2-й ветви, соответственно, м/с; λ_1, λ_2 – безразмерные коэффициенты потерь давления из-за трения по длине 1-й и 2-й трубы, соответственно; ζ_1, ζ_2 – безразмерные коэффициенты суммарных потерь давления в местных гидравлических сопротивлениях 1-й и 2-й ветви, соответственно; g – ускорение свободного падения, м/с^2.

В [16, 17] экспериментально и теоретически было показано, что коэффициенты потерь λ и ζ при течении степенной жидкости в трубопроводе можно находить по формулам ньтоновской жидкости, но вместо обычных малых чисел Рейнольдса следует подставлять его приведенное значение Re_{PL}:

$$\lambda = 64/\,Re_{PL},\ \zeta = \Theta/\,Re_{PL}, \quad (4)$$

$$Re_{PL} = \frac{W^{2-m} d^m \rho}{8^{m-1} K \cdot \left(\frac{3m+1}{4m}\right)^m}. \quad (5)$$

где Θ – безразмерный коэффициент, зависящий от типа местного гидравлического сопротивления и его безразмерных параметров. В [16, 17] было показано, что значения коэффициентов Θ имеют приблизительно такие же значения, как и для ньютоновской жидкости. В дальнейших расчетах примем Θ в соответствии с [1, с. 80].

Подставив (4), (5) в (3), получим уравнение для определения отношения δ:

$$\Psi + 64 + \Sigma_1 - (q/\delta^3)^m\cdot(64\cdot l/\delta + \Sigma_2) = 0, \quad (6)$$

$$\Sigma_1 = \Sigma\Theta_1\, d_1/L_1,\ \Sigma_2 = \Sigma\Theta_2\, d_1/L_1,\ q = Q_2/Q_1,\ l = L_2/L_1, \quad (7)$$

$$\Psi = [\rho g(H_1 - H_2) + P_1 - P_2]\cdot d_1/[2^{3m-4} L_1 K\cdot(4\cdot Q_1/(\pi d_1^3))^m]. \quad (8)$$

Заметим, что в отличие от [13] уравнение (6) записано в безразмерной форме. Видно, что отношение диаметров δ зависит от чисел подобия Ψ, q, l, Σ_1, Σ_2, m. В общем случае алгебраическое уравнение (6) не имеет аналитического решения. Для его решения был использован численный метод в среде Mathcad. Первый множитель в формуле (8) обозначим как статическая разность приведенных давлений:

$$\Delta P_C = \rho g(H_1 - H_2) + P_1 - P_2. \quad (9)$$

Результаты и обсуждение

Положим, что местные гидравлические сопротивления в ветвях одинаковые: $\Sigma\Theta_1 = \Sigma\Theta_2 = 3830$ (два поворота на 90°, вентиль и выход из трубы в бак). Определим порядок числа подобия Ψ. Для чего зададим следующие размерные параметры технологического трубопровода, входящие в формулу (8): $\Delta P_C = 5{,}05 \cdot 10^4$ Па, $L_1 = 20$ м, $d_1 = 0{,}05$ м, $Q_1 = 10^{-4}$ м^3/с.

По этим параметрам $\Sigma_1 = \Sigma_2 = \Sigma\Theta_1$, $d_1/L_1 = 3830 \cdot 0{,}05/20 = 9{,}575$. Кроме того, в базовой версии зададим такие отношения: расходов q=0,8, длин труб l=1,5. Значения m и K из табл. 1 подставим в (8). Результаты расчета Ψ и решения уравнения (6) записаны в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты решения уравнения (6) для разных пищевых сред (d_1 = 0,05 м)

Пищевая масса	Ψ	δ	d_2, м
ПС-1	774,3	0,476	0,024
ПС-2	302,2	0,623	0,031
МФ-1	5,20	1,175	0,059
МФ-2	1,80	1,289	0,061

По табл. 2 видно, что с увеличением эффективной вязкости среды число подобия Ψ заметно уменьшается. Полученный диапазон Ψ=0-800 будем использовать в дальнейшем анализе. Причем Ψ=0 означает, что приведенные статические давления в емкостях одинаковы. При подаче МФ вязкость настолько велика, что значимость увеличения гидравлических потерь по длине трубопровода (l=1,5) оказывается выше, чем меньший расход (q=0,8). Поэтому диаметр второй ветви больше, чем первой (δ>1). При подаче ПС эффект обратный (δ<1).

На рис. 2-5 показаны результаты численного исследования в найденном диапазоне Ψ при варьировании значений одного из чисел подобия. По рис. 2 видно, при одинаковой длине ветвей, чтобы возрастало отношение расходов q, необходимо увеличивать отношение диаметров труб δ.

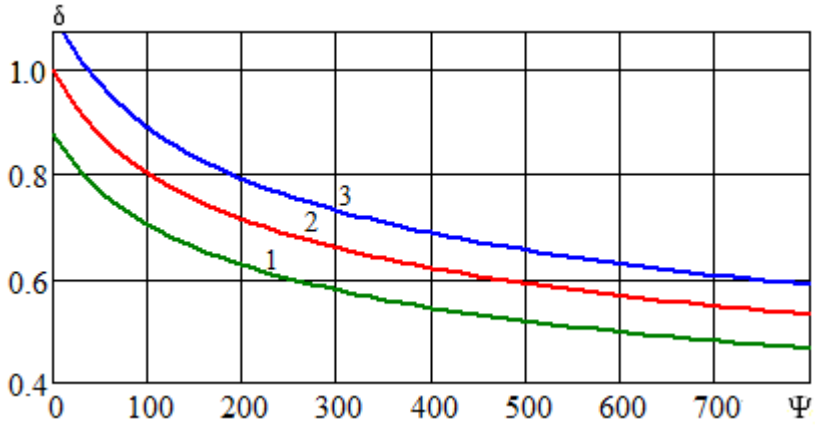


Рисунок 2 – Зависимость отношения диаметров от Ψ при Φ=9,575; l=1 и различных значениях отношения расходов: 1 – q = 0,6; 2 – q = 1,0; 3 – q = 1,5

Чтобы обеспечить одинаковые расходы в ветвях, чем больше отношение l, тем больше должно быть δ (рис. 3). По рис. 4 величина Ф должна быть достаточно большой, чтобы ее изменение отразилось на δ. В базовой версии значений параметров получилось Ф=9,575. Чтобы получить Ф=60, нужно увеличить ΣΘ примерно в 6 раз, либо уменьшить L_1/d_1 6 раз.

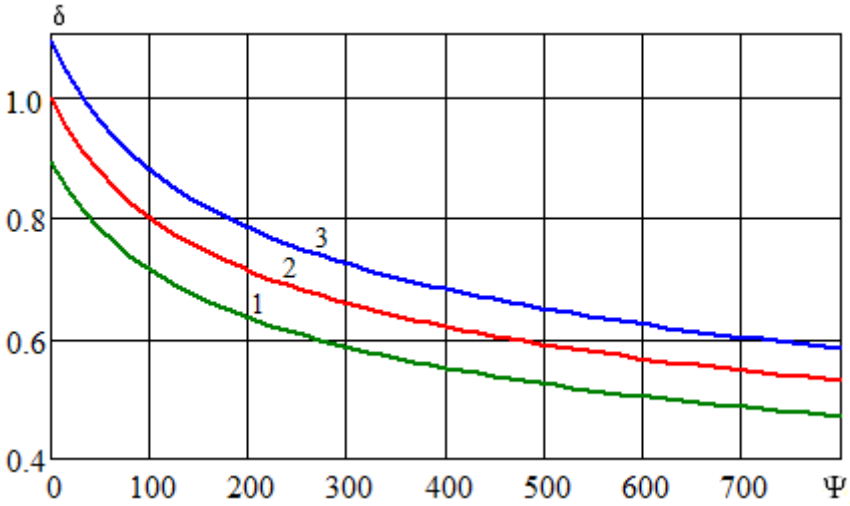


Рисунок 3 – Зависимость отношения диаметров от Ψ при Ф=9,575; q=1 и различных значениях отношения длины ветвей: 1 – l= 0,6; 2 – l = 1,0; 3 – l = 1,5

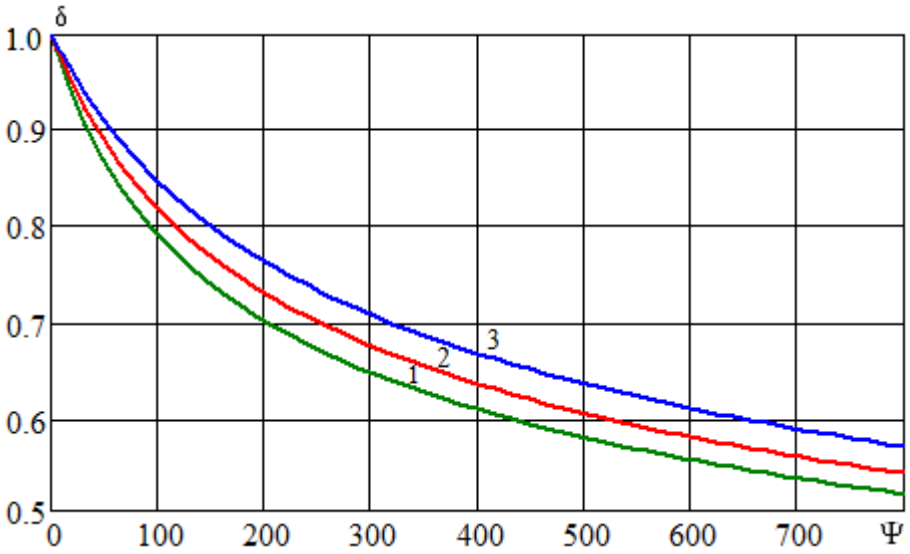


Рисунок 4 – Зависимость отношения диаметров от Ψ при q=1, l=1 и различных значениях Ф: 1 – Ф = 0; 2 – Ф = 25; 3 – Ф = 60

Большой интерес представляет влияние безразмерного индекса течения на отношение диаметров ветвей. По рис. 5 видно, чем меньше значение m, тем больше отклонение δ от единицы. Влияет на величину δ не только m, но и коэффициент консистенции жидкости. По формуле (8) K входит в знаменатель критерия Ψ. Поэтому при изменении величины K, будет изменяться и Ψ. Соответственно, графики на рис. 5 сместятся по оси абсцисс. Величина K не будет влиять на результаты расчета лишь тогда, когда приведенные статические давления в емкостях на рис. 1 одинаковы (Ψ=0). Но влияние индекса течения сохранится и в этом частном случае.

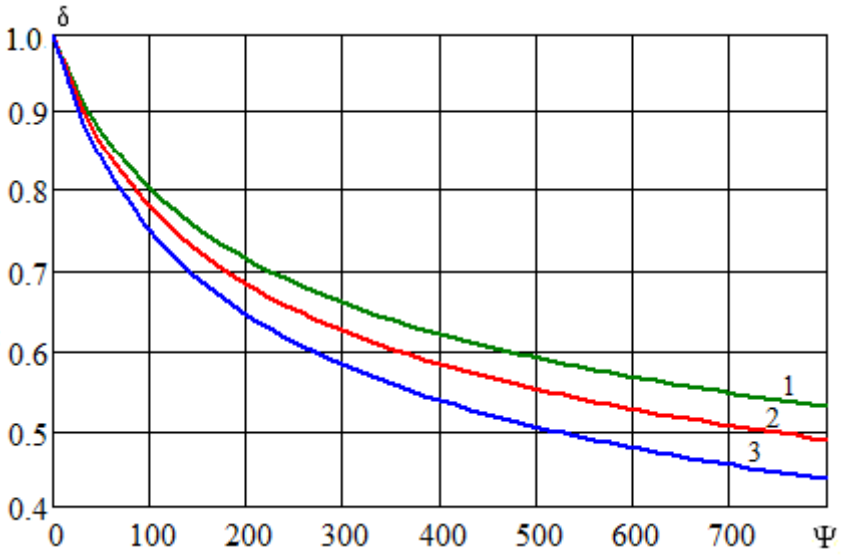


Рисунок 5 – Зависимость отношения диаметров от Ψ при q=1, l=1, Ф=9,57 и различных m: 1 – m = 1; 2 – m = 0,85; 3 – m = 0,7

Рассмотрим частный случай: статическое давление в резервуарах одинаковое (Ψ=0), потери в местных сопротивлениях невелики, ими можно пренебречь ($Ф_2$=$Ф_1$≈0). Тогда из уравнения (6) можно выразить отношение диаметров:

$$\delta = (q^m \, l \,)^{1/(3m+1)}. \qquad (10)$$

В табл. 3 и 4 представлены результаты расчета отношения диаметров по формуле (10) при двух значениях индекса течения.

Таблица 3 – Результаты расчета отношения диаметров по формуле (10) при m=1 (ньютоновская жидкость)

l	q				
	0,6	0,9	1,0	1,3	1,5
0,4	0,700	0,775	0,795	0,849	0,880
0,6	0,775	0,857	0,880	0,940	0,974
0,8	0,832	0,921	0,946	1,010	1,047
1,0	0,880	0,974	1,0	1,068	1,107
1,2	0,921	1,019	1,047	1,118	1,158
1,4	0,957	1,059	1,088	1,161	1,204
1,6	0,990	1,095	1,125	1,201	1,245

Таблица 4 – Результаты расчета отношения диаметров по формуле (10) при m=0,209 (куриный фарш МФ-1)

l	q				
	0,6	0,9	1,0	1,3	1,5
0,4	0,533	0,565	0,569	0,589	0,600
0,6	0,684	0,721	0,731	0,756	0,770
0,8	0,816	0,860	0,872	0,902	0,918
1,0	0,936	0,987	1,0	1,034	1,053
1,2	1,048	1,104	1,119	1,157	1,178
1,4	1,152	1,213	1,230	1,272	1,295
1,6	1,250	1,317	1,335	1,381	1,406

Сравнение результатов расчета в табл. показывает, изменение q и l при m=0,209 (МФ-1) влияет на отклонение δ от единицы сильнее, чем при подаче ньютоновской жидкости (m=1). Например, у МФ-1 δ=0,565 при q= 0,9 и l =0,4, а у ньютоновской жидкости в тех же условиях – δ=0,775; у МФ-1 δ=1,406 при q= 1,5 и l =1,6, а у ньютоновской жидкости в тех же условиях – δ=1,245.

Заключение

Таким образом, ранее разработанный метод определения отношения диаметров ветвей трубопровода обобщен на условия подачи неньютоновских пищевых сред с высокой вязкостью. Алгебраическое уравнение для расчета указанного отношения получено в безразмерной форме. Числами подобия задачи являются: q – отношение расходов пищевой среды в ветвях, l – отношение длин труб в ветвях, m – безразмерный индекс течения, Ψ – безразмерный комплекс, прямо пропорциональный разности приведенных статических давлений в емкостях и обратно пропорциональный коэффициенту консистенции жидкости, Θ_1 и Θ_2 – безразмерные показатели местных гидравлических сопротивлений в ветвях. Названное алгебраическое уравнение в общем случае не имеет аналитического решения. Оно было решено численным методом при разных значениях чисел подобия. В частном случае (Θ_1=Θ_2=0, Ψ=0) отношение диаметров можно найти по формуле (10) по значениям q, l и m.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Альтшуль А.Д., Калицун В.И., Майрановский Ф.Г., Пальгунов П.П. Примеры расчетов по гидравлике. Москва: Стройиздат, 1977. 255 с.
2. Наумов В.А. Механика движения неоднородных сред. Калининград: Изд-во КГТУ, 2005. 125 с.
3. Li Y.R., Someya, S., Okamoto K. An experimental investigation of flow-induced acoustic resonance and flow field in a closed side branch system using a high time-resolved PIV technique. Journal of Visualization. 2010. Vol. 13. P. 7-16.
4. Агафонов Е.Д., Безбородов Ю.Н., Миронов А.Г. Об особенностях использования системы Matlab/SimHydraulics в задаче построения моделей магистральных нефтепроводов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 3. С. 76-81.
5. Моделирование гидроудара в разветвленных трубопроводных системах / С.И. Сумской, М.В. Лисанов, А.А. Агапов и др. // Безопасность труда в промышленности. 2015. № 10. С. 60-66.
6. Sumskoi S.I., Sverchkov A.M., Lisanov M.V., Egorov A.F. Modelling of nonequilibrium flow in the branched pipeline systems // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 751, 2016. ID 012022. DOI:10.1088/1742-6596/751/1/012022.
7. Visualization of flow parameters in the branched systems using tree-like graphs (by the example of flow in the pipeline) / S.A. Gubin, S.I. Sumskoi, A.M. Sverchkov et. al. // Scientific Visualization, 2018. Vol. 10, No. 1. P. 1-17.
8. Huang W., Zha R. Numerical studies on internal flow in pipelines of an aquaculture vessel and flow control using a special branch pipe // Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 10. ID 1140285. DOI: 10.3389/fmars.2023.1140285.
9. Кузнецов Ю.А., Тарасов Е.С., Смикалин Н.С. Исследование гидродинамических характеристик потока в Y-образных тройниках // Инновации и инвестиции. 2019. № 3. С. 194-196.
10. Лобанов И.Е. Теоретическое аналитическое решение задачи о стационарном докритическом течении газообразного теплоносителя в разветвлениях трубопроводов

теплообменных аппаратов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 9 (82). С. 25-35.

11. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Моделирование характеристик водокольцевых вакуумных насосов // Известия вузов. Машиностроение. 2019. № 10. С. 70-77.

12. Mayakova S.A., Privalov L.Y. Thermal and hydraulic calculation in a model of industrial branched pipeline transporting a single-phase liquid flow // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 224. ID 01048. DOI: 10.1051/e3sconf/202022401048.

13. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Шторк А.В. Выбор диаметров ветвей тупиковой системы водоснабжения // Технико-технологические проблемы сервиса. 2024. № 2(68). С. 40-44.

14. Dimitreli G., Thomareis A.S. Effect of temperature and chemical composition on processed cheese apparent viscosity // Journal of Food Engineering. 2004. Vol. 64, No. 2. P. 265-271.

15. Наумов В.А. Производительность и энергетическая эффективность коловратного насоса при перекачивании мясного фарша // Все о мясе. 2024. № 4. С. 27-32.

16. Csizmadia P., Till S. The effect of rheology model of an activated sludge on to the predicted losses by an elbow // Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering. 2018. Vol. 62, No. 4. P. 305-311.

17. Bibok M., Csizmadia P., Till S. Experimental and numerical investigation of the loss coefficient of a 90° pipe bend for power-law fluid // Periodica Polytechnica. Chemical Engineering. 2020. Vol. 64, No.4. P. 469-478.

REFERENCES

1. Al'tshul' A.D., Kalicun V.I., Majranovskij F.G., Pal'gunov P.P. *Primery raschetov po gidravlike* [Examples of calculations in hydraulics: monograph]. Moscow: Stroyizdat, 1977. 255 p.

2. Naumov V.A. *Mekhanika dvizheniya neodnorodnyh sred* [Mechanics of inhomogeneous media motion]. Kaliningrad: KGTU Publ., 2005. 125 p.

3. Li Y.R., Someya S., Okamoto K. An experimental investigation of flow-induced acoustic resonance and flow field in a closed side branch system using a high time-resolved PIV technique. Journal of Visualization. 2010. Vol. 13, pp. 7-16.

4. Agafonov E.D., Bezborodov YU.N., Mironov A.G. *Ob osobennostyah ispol'zovaniya sistemy Matlab/SimHydraulics v zadache postroeniya modelej magistral'nyh nefteprovodov* [On the features of using the Matlab/SimHydraulics system in the task of constructing models of trunk oil pipelines]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. No. 3, pp. 76-81.

5. Sumskoj S.I., Lisanov M.V., Agapov A.A. i dr. *Modelirovanie gidroudara v razvetvlennyh truboprovodnyh sistemah* [Modeling of hydraulic shock in branched pipeline systems]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2015. No. 10, pp. 60-66.

6. Sumskoi S.I., Sverchkov A.M., Lisanov M.V., Egorov A.F. Modelling of nonequilibrium flow in the branched pipeline systems. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 751, 2016. ID 012022. DOI:10.1088/1742-6596/751/1/012022.

7. Gubin S.A., Sumskoi S.I., Sverchkov A.M. et. al. Visualization of flow parameters in the branched systems using tree-like graphs (by the example of flow in the pipeline). Scientific Visualization, 2018. Vol. 10, No. 1, pp. 1-17.

8. Huang W., Zha R. Numerical studies on internal flow in pipelines of an aquaculture vessel and flow control using a special branch pipe. Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 10. ID 1140285. DOI: 10.3389/fmars.2023.1140285.

9. Kuznecov Yu.A., Tarasov E.S., Smikalin N.S. *Issledovanie gidrodinamicheskih harakteristik potoka v Y-obraznyh trojnikah* [Investigation of the hydrodynamic characteristics of the flow in Y-shaped tees]. *Innovacii i investicii.* 2019. No. 3, pp. 194-196.

10. Lobanov I.E. *Teoreticheskoe analiticheskoe reshenie zadachi o stacionarnom dokriticheskom techenii gazoobraznogo teplonositelya v razvetvleniyah truboprovodov teploobmennyh apparatov* [Theoretical analytical solution of the problem of stationary subcritical flow of a gaseous coolant in the branches of pipelines of heat exchangers]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2019. No. 9 (82), pp. 25-35.

11. Velikanov N.L., Naumov V.A. *Modelirovanie harakteristik vodokol'cevyh vakuumnyh nasosov* [Modeling of characteristics of water-ring vacuum pumps]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2019. No. 10, pp. 70-77.

12. Mayakova S.A., Privalov L.Y. Thermal and hydraulic calculation in a model of industrial branched pipeline transporting a single-phase liquid flow. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 224. ID 01048. DOI: 10.1051/e3sconf/202022401048.

13. Velikanov N.L., Naumov V.A., Shtork A.V. *Vybor diametrov vetvej tupikovoj sistemy vodosnabzheniya* [Selection of branch diameters of a dead-end water supply system]. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2024. No. 2(68), pp. 40-44.

14. Dimitreli G., Thomareis A.S. Effect of temperature and chemical composition on processed cheese apparent viscosity. Journal of Food Engineering. 2004. Vol. 64, No. 2, pp. 265-271.

15. Naumov V.A. *Proizvoditel'nost' i energeticheskaya effektivnost' kolovratnogo nasosa pri perekachivanii myasnogo farsha* [Productivity and energy efficiency of a lobe pump when pumping minced meat]. *Vse o myase.* 2024. No. 4, pp. 27-32.

16. Csizmadia P., Till S. The effect of rheology model of an activated sludge on to the predicted losses by an elbow. Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering. 2018. Vol. 62, No.4, pp. 305-311.

17. Bibok M., Csizmadia P., Till S. Experimental and numerical investigation of the loss coefficient of a 90° pipe bend for power-law fluid. Periodica Polytechnica. Chemical Engineering. 2020. Vol. 64, No.4, pp. 469-478.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Наумов Владимир Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: van-old@mail.ru)	*Naumov Vladimir Arkad'evich* – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: van-old@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 12.10.2025; одобрена после рецензирования 24.10.2025, принята к публикации 07.11.2025.
The article was submitted 12.10.2025; approved after reviewing 24.10.2024; accepted for publication 07.11.2025.