

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-1-89-95
УДК 622.276.53-054

М.Я. Хабибуллин (Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском, г. Октябрьский, Республика Башкортостан, Российская Федерация)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ С МЕНЯЮЩИМСЯ ДИАМЕТРОМ

Marat Ya. Khabibullin (Oktyabrskiy Affiliate of Ufa State Petroleum Technological University, Oktyabrskiy, Republic of Bashkortostan, Russian Federation)

STUDY OF LIQUID FLOW PROCESSES IN PIPELINE WITH CHANGING DIAMETER

Введение

С целью повышения эффективности процессов перекачки углеводородных жидкостей в системах сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов на нефтепромыслах при сохранении высокой надежности предлагается использовать трубопроводы с периодически изменяющимся сечением. Данная работа посвящена исследованию течения однородной несжимаемой жидкости по трубе, состоящей из конфузоро-диффузорных элементов типа трубы Вентури.

Цели и задачи

Установить распределения в трубе с периодически меняющимся сечением локальных скоростей, давлений, кинетической энергии турбулентности и скоростей диссипации энергии на основе ($k-\epsilon$)-модели турбулентности с использованием метода конечных элементов.

Результаты

Упрощенная инженерная методика расчета позволяет с удовлетворительной точностью определять распределение скоростей, ускорений и давлений вдоль трубы с периодически меняющимся сечением, а также частоту колебаний.

Background

In order to increase the efficiency of hydrocarbon liquids transfer processes in systems for gathering, treatment and transporting oil and oil products in oil fields while maintaining high reliability, it is proposed to use pipelines with a periodically varying cross section. This work is devoted to the study of homogeneous incompressible fluid flow through a pipe consisting of confusor-diffuser elements of the Venturi type pipe.

Aims and Objectives

To define distributions in a pipe with periodically varying cross sections of local velocities, pressures, kinetic energy of turbulence, and energy dissipation rates based on the ($k-\epsilon$)-turbulence model using the finite element method.

Results

The simplified engineering method of calculation allows determining the distribution of velocities, accelerations and pressures along a pipe with a periodically varying cross section, as well as the oscillation frequency with satisfactory accuracy.

Гидравлическое сопротивление и общие потери энергии в рассматриваемой трубе с периодически меняющимся сечением несколько ниже, чем в прямой цилиндрической трубе той же длины и с диаметром, равным диаметру меньшей горловины, при прочих равных условиях.

Hydraulic resistance and total energy losses in the pipe under consideration with a periodically varying cross section are slightly lower than in a straight cylindrical pipe of the same length and with a diameter equal to the diameter of the smaller neck, with other things being equal.

Ключевые слова: скорость, диссипация, энергия, турбулентность, диффузор, конфузор

Key words: rate, dissipation, energy, turbulence, diffuser, confuser

Стремясь повысить эффективность работы нефтепромыслового оборудования при сохранении высокой надежности, исследователи и разработчики пытаются использовать каналы с периодически меняющимся сечением для повышения процессов перекачки углеводородных жидкостей в системах сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов.

Так, в 1970 г. было предложено использовать периодическое изменение скорости в таком массообменном устройстве для ускорения процесса растворения твердых частиц [1]. В работе [2] описан новый тип трубчатотурбулентных реакторов, предназначенных для проведения быстрых полимеризационных процессов. В работе [3] исследованы закономерности турбулентного смешения в трубчатых аппаратах типа диффузор-конфузор. Аналогичное устройство предлагается использовать и для обработки жидкостями капиллярно-пористых частиц – пропитка и экстрагирование [4].

Таким образом, интерес к использованию труб с периодически меняющимся сечением в нефтехимической отрасли в последние годы возрос. В то же время нет простой инженерной методики расчета гидродинамических характеристик этих устройств, что су-

щественно затрудняет расчеты массообменных процессов, протекающих в них.

В последние 20 лет наметилась тенденция к развитию одного из перспективных направлений интенсификации межфазного обмена в гетерогенных средах – ввод энергии преимущественно в непосредственной близости от границы раздела фаз [5-7]. Действительно, турбулизация всей массы сплошной среды, как, например, в аппаратах с мешалками, явление нежелательное, связанное с увеличением энергозатрат на непроизводительную диссипацию мощности. Таким образом, одинаковое количество вводимой в аппарат энергии может использоваться с различными энергетическими КПД, которые можно определить, как отношение полезной мощности N_n , расходуемой на дробление и относительное движение фаз, и общей мощности N , теряемой в аппарате. Общую мощность, в свою очередь, можно представить как сумму мощностей:

$$N = N_n + N_d,$$

где N_d – мощность, диссипируемая в объеме вдали от поверхности частиц дисперсной фазы (вблизи мешалки) на стенках аппарата, в объеме сплошной среды при измельчении турбулентных вихрей, Вт.

Величина КПД влияет на площадь межфазной поверхности, скорость относительного движения фаз и, в конечном итоге, на скорость массообменных процессов. КПД, в свою очередь, зависит от конструкции аппарата, его режимных параметров, а главным образом, от способа ввода энергии, т.е. от характера движения рабочей среды (вращательного, поступательного, закрученного, колебательного и т.д.).

В работе [6] приведены данные о влиянии удельной скорости диссипации энергии на ε размеры капель при эмульгировании: максимальный диаметр капель d_{\max} для механических мешалок при $\varepsilon \sim 10^3 \dots 10^4$ Вт/кг составляет 50-100 мкм, для пульсационного ввода энергии при тех же значениях ε диаметр $d_{\max} \approx 2 \dots 8$ мкм, т.е. при пульсациях размеры капель примерно на порядок меньше.

Попытки сосредоточить диссипацию энергии вблизи границы раздела фаз направлены в основном на использование пульсаций потока жидкости, возбуждаемых внешним генератором; переменного сдвигового поля; пульсаций, возбуждаемых течением жидкости сквозь канал с переменным поперечным сечением.

Данная работа посвящена исследованию третьего случая – течению однородной несжимаемой жидкости по трубе, состоящей из конфузурно-диффузорных элементов типа трубы Вентури (рисунок 1).

В результате проведенных исследований было получено распределение в трубе с периодически меняющимся сечением локальных скоростей, давлений, кинетической энергии турбулентности и скоростей диссипации энергии на основе ($k-\varepsilon$)-модели турбулентности [8] с использованием метода конечных элементов.

На рисунке 2 показан фрагмент поля скоростей в зоне сопряжения конфузора с горловиной.

Однако в инженерной практике вполне допустимо использовать одномерную модель течения жидкости в элементах типа трубы Вентури [9].

В произвольном сечении x диаметр конфузора определяется выражением

$$D_x(x) = D - Bx, \quad (1)$$

где $B = (D - d)/L_1 = 2\text{tg}(\alpha/2)$;

D, d, L_1, α – геометрические размеры (см. рисунок 1).

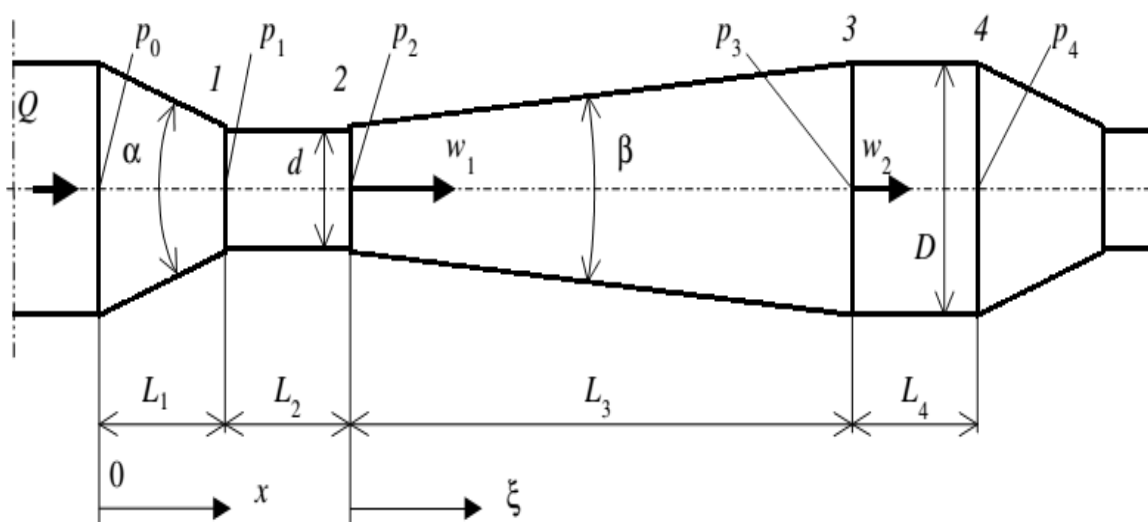


Рисунок 1. Схема конфузурно-диффузорного элемента трубы с периодическим профилем

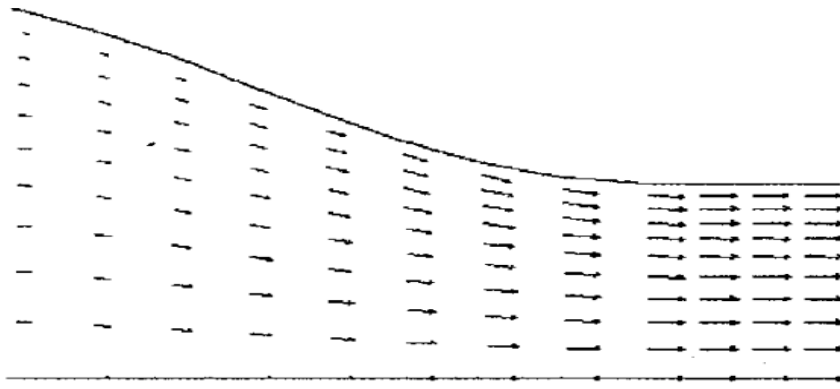


Рисунок 2. Расчетное поле скоростей вблизи сопряжения конфузора с горловиной при расходе жидкости $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ (длина стрелок пропорциональна локальной скорости; максимальная скорость равна $10,4 \text{ м/с}$)

Площадь этого поперечного сечения определяется по формуле:

$$S_k(x) = (\pi/4) (D - Bx)^2, \quad (2)$$

а средняя расходная скорость жидкости в нем – по формуле:

$$w_k(x) = Q / S_k(x), \quad (3)$$

где Q – объёмный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$.

Аналогично для диффузора в смещенной системе координат ($\xi = x - L_1 - L_2$) нетрудно получить выражения для расчета диаметра его поперечного сечения:

$$D_d(\xi) = d + A\xi, \quad (4)$$

где $A = (D-d)/L_3 = 2\text{tg}(\beta/2)$; L_3 ;

β – геометрические размеры (см. рисунок 1);

для площади этого сечения:

$$S_d(\xi) = (\pi/4) (d + A\xi)^2, \quad (5)$$

а также средней расходной скорости жидкости в нем

$$w_d(\xi) = Q / S_d(\xi). \quad (6)$$

В общем случае ускорение a потока жидкости, движущейся вдоль оси x со скоро-

стью w , складывается из локальной (первое слагаемое) и конвективной (второе слагаемое) составляющих:

$$a = dw/dt = \partial w/\partial t + w(\partial w/\partial x),$$

где t – время, с.

В рассматриваемом случае стационарного течения локальное ускорение $\partial w/\partial t = 0$. Однако частица жидкости или газа, перемещаясь с потоком, испытывает действие конвективного ускорения, которое можно записать в виде

$$a = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w^2}{2} \right). \quad (7)$$

Силы, обусловленные действием конвективного ускорения, способны привести к существенной деформации и дроблению дисперсных включений (капель и пузырей).

Для недеформируемых частиц действие конвективного ускорения сводится к периодическому пульсационному обновлению жидкости вблизи поверхности твердой частицы [10].

Найдем распределение конвективного ускорения в конфузоре и диффузоре. Принимая во внимание выражения (2), (3), (7), в результате преобразований для конфузора получим

$$a_k(x) = 32B(Q\pi)^2(D - Ax)^{-5}. \quad (8)$$

Аналогично для диффузора из формул (5) - (7) следует

$$a_d(\xi) = -32A(Q\pi)^2(D + A\xi)^{-5}. \quad (9)$$

Знак «-» в выражении (9) свидетельствует о торможении потока при его расширении, знак «+» в выражении (8) – о разгоне при сужении потока.

Следующая важная характеристика потока, движущегося в трубе с периодически меняющимся сечением, – частота возникающих при его расширении-сжатии пульсаций давления и скорости [11].

Рассмотрим диффузорный участок трубы Вентури. Найдем время, необходимое для достижения произвольного сечения X частицей жидкости, стартовавшей в точке $\xi = 0$. В формулировке Эйлера [8] скорость потока определяется выражением $w = dx/dt$, откуда следует, что $dt = dx/w$. Интегрируя это выражение от 0 до X по пространственной координате и от 0 до t_x по времени, с учетом соотношений (5), (6) получим

$$t_x = \int_0^X (\pi/4Q)(d + A\xi)^2 d\xi = (\pi/12QA)[(d + A\xi)^3 - d^3]. \quad (10)$$

Подставив $X = L_3$ в выражение (10), получим полное время прохождения частицей жидкости длины диффузора

$$t_{L_3} = (\pi/12QA)(D^3 - d^3) = (\pi L_3/12Q)(D^2 + Dd + d^2). \quad (11)$$

Нетрудно заметить, что в правой части последнего уравнения записано отношение объема усеченного конуса, образованного диффузором, к расходу жидкости, т.е.

$$t_{L_3} = W_d/Q, \quad (12)$$

где $W_d = (\pi L_3/12)(D^2 + Dd + d^2)$ – объем жидкости в диффузоре, m^3 .

Тем же путем можно получить полное время прохождения частицей жидкости длины конфузора

$$t_{L_1} = (\pi L_1/12Q)(D^2 + Dd + d^2) = W_k/Q, \quad (13)$$

где $W_k = (\pi L_1/12)(D^2 + Dd + d^2)$ – объем жидкости в конфузоре, m^3 ;

t_{L_2} – время, за которое частица жидкости проходит узкий (диаметром d) цилиндрический участок горловины, $t_{L_2} = \pi d^2 L_2 / 4Q$, с;

t_{L_4} – время, за которое частица жидкости проходит широкий участок горловины (диаметром D), $t_{L_4} = \pi D^2 L_4 / 4Q$, с.

Общее время прохождения частицей жидкости одного элемента типа трубы Вентури длиной $L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$ составляет

$$Z = t_{L_1} + t_{L_2} + t_{L_3} + t_{L_4} = \Sigma W / Q, \quad (14)$$

то есть не что иное, как период колебаний давления, скорости и ускорения для частицы жидкости, движущейся вместе с потоком (ΣW – суммарный объем жидкости в одном элементе типа трубы Вентури длиной L).

Выводы

Упрощенная инженерная методика расчета позволяет с удовлетворительной точностью определять распределение скоростей, ускорений и давлений вдоль трубы с периодически меняющимся сечением, а также частоту колебаний.

Гидравлическое сопротивление и общие потери энергии в рассматриваемой трубе с периодически меняющимся сечением несколько ниже, чем в прямой цилиндрической трубе той же длины и с диаметром, равным диаметру меньшей горловины, при прочих равных условиях.

Список литературы

1. Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело - жидкость. Львов: Изд-во Львовск. ун-та, 1970. 188 с.
2. Берлин А.А., Минскер К.С., Захаров В.П. О новом типе реакторов для проведения быстрых процессов // Доклады Академии наук. 1999. Т. 365. № 3. С. 360-363.

References

1. Aksel'rud G.A. *Massoobmen v sisteme tverdoe telo - zhidkost'* [Mass Transfer in a Solid - Liquid System]. Lviv, University of Lviv Publ., 1970, 188 p. [in Russian].
2. Berlin A.A., Minsker K.S., Zakharov V.P. O novom tipe reaktorov dlya provedeniya bystrykh protsessov [On a New Type of Reactor for Conduct-

3. Тахаутдинов Р.Г., Дьяконов Г.С., Дебердеев Р.Я., Минскер К.С. Турбулентное смешение в малогабаритных аппаратах химической технологии // Химическая промышленность. 2000. № 5. С. 41-49.
4. Абиев Р.Ш., Аксенович Е.Г., Островский Г.М. Новые разработки пульсационной резонансной аппаратуры для жидкофазных систем // Химическая промышленность. 1994. № 11. С. 764-766.
5. Островский Г.М. Перенос в неоднородных средах при вибрационных воздействиях // Инженерно-физический журнал. 1988. Т. 55. № 5. С. 866.
6. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Принципы разработки новых энерго-, ресурсосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии // Промышленная теплотехника. 1997. Т. 19. № 4-5. С. 13-25.
7. Долинский А.А., Никорчевский А.И. Принципы оптимизации массообменных технологий на основе метода дискретно-импульсного ввода энергии // Промышленная теплотехника. 1997. Т. 19. № 6. С. 5-9.
8. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
9. Хабибуллин М.Я. Повышение эффективности закачки жидкости в нагнетательные скважины // Современные технологии в нефтегазовом деле - 2015: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., г. Октябрьский, 28 марта 2018 г.: в 2 т. / Отв. ред. В.Ш. Мухаметшин. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. С. 161-167.
10. Хабибуллин М.Я. Универсальная система очистки сточных вод при импульсном нестационарном заводнении // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. Вып. 1 (111). С. 44-51.
11. Хабибуллин М.Я., Сидоркин Д.И. Определение параметров колебаний колонны насосно-компрессорных труб при импульсной закачке жидкостей в скважину // Научные труды НИПИ-Нефтегаз ГНКАР. 2016. Т. 3. № 3. С. 27-32.
- ing Fast Processes]. *Doklady Akademii nauk - Reports of the Academy of Sciences*, 1999, Vol. 365, No. 3, pp. 360-363. [in Russian].
3. Takhautdinov R.G., D'yakonov G.S., Deberdeev R.Ya., Minsker K.S. Turbulentnoe smeshenie v malogabaritnykh apparatakh khimicheskoi tekhnologii [Turbulent Mixing in Small-Sized Apparatus of Chemical Technology]. *Khimicheskaya promyshlennost' - Chemical Industry*, 2000, No. 5, pp. 41-49. [in Russian].
4. Abiev R.Sh., Aksenovich E.G., Ostrovskii G.M. Novye razrabotki pul'satsionnoi rezonansnoi apparatury dlya zhidkofaznykh sistem [New Developments of Pulsation Resonance Equipment for Liquid-Phase Systems]. *Khimicheskaya promyshlennost' - Chemical Industry*, 1994, No. 11, pp. 764-766. [in Russian].
5. Ostrovskii G.M. Perenos v neodnorodnykh sredakh pri vibratsionnykh vozdeistviyakh [Transfer in Inhomogeneous Media under Vibration Effects]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal - Engineering-Physical Journal*, 1988, Vol. 55, No. 5, pp. 866. [in Russian].
6. Dolinskii A.A., Ivanitskii G.K. Printsipy razrabotki novykh energo-, resursosberegayushchikh tekhnologii i oborudovaniya na osnove metodov diskretno-impul'snogo vvoda energii [Principles of Development of New Energy-, Resource-Saving Technologies and Equipment Based on the Methods of Discrete-Pulse Input of Energy]. *Promyshlennaya teplotekhnika - Industrial Heat Engineering*, 1997, Vol. 19, No. 4-5, pp. 13-25. [in Russian].
7. Dolinskii A.A., Nikorchevskii A.I. Printsipy optimizatsii massoobmennykh tekhnologii na osnove metoda diskretno-impul'snogo vvoda energii [Principles of Optimization of Mass Transfer Technologies Based on the Method of Discrete-Pulse Input of Energy]. *Promyshlennaya teplotekhnika - Industrial Heat Engineering*, 1997, Vol. 19, No. 6, pp. 5-9. [in Russian].
8. Korn G.A., Korn T.M. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 832 p. [in Russian].
9. Khabibullin M.Ya. Povyshenie effektivnosti zakachki zhidkosti v nagnetatel'nye skvazhiny [Improving the Efficiency of Injection of Fluid into Injection Wells]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Sovremennye tekhnologii v neftegazovom dele - 2015», Oktyabr'skii, 28 marta 2018 g.: v 2 t.* [Materials of the Scientific Works of International Scientific and Technical Conference «Modern Technologies in the Oil and Gas Business - 2015», Oktyabr'sky, March 28, 2018: in 2 Vol.]. Ufa, UGNTU Publ., 2015, pp. 161-167. [in Russian].
10. Khabibullin M.Ya. Universal'naya sistema oчитki stochnykh vod pri impul'snom nestatsionarnom zavodnenii [Improved Sewage Treatment System at the Pulsed Non-Stationary Waterflooding]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil*

Products, 2018, Issue 1 (111), pp. 44-51. [in Russian].

11. Khabibullin M.Ya., Sidorkin D.I. Opredelenie parametrov kolebanii kolonny nasosno-kompressornykh trub pri impul'snoi zakachke zhidkosti v skvazhinu [Determination of the Oscillation Parameters of the Tubing String during Pulsed Pumping of Liquids into the Well]. *Nauchnye trudy NIPINeftegaz GNKAR - Scientific Works of NIPINeftegaz SOCAR*, 2016, Vol. 3, No. 3, pp. 27-32. [in Russian].

Автор

• Хабибуллин Марат Яхиевич, канд. техн. наук
Филиал Уфимского государственного нефтяного
технического университета в г. Октябрьском
Доцент кафедры «Нефтепромысловые машины
и оборудование»
Российская Федерация, 452607, Республика
Башкортостан, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54 а
e-mail: m-hab@mail.ru

The Author

• Khabibullin Marat Ya., Candidate of Engineering
Sciences
Oktyabrskiy Affiliate of Ufa State Petroleum
Technological University
Assistant Professor of Oilfield Machines
and Equipment Department
54 a, Devonskaya str., Oktyabrskiy, Republic
of Bashkortostan, 452607, Russian Federation
e-mail: m-hab@mail.ru