УДК 622.692.4

В. В. Плотников, Н. В. Богданова, А. В. Самойлов

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ТРУБОПРОДНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЖИДКОСТЕЙ

Ключевые слова: интегральные методы, турбулентность, коэффициент трения.

Рассмотрено движение жидкости по трубам, приводятся результаты расчета гидромеханических и интегральных характеристик потока с учетом потерь давления при интенсификации, для оптимального выбора технологического оборудования.

Keywords: integral methods, turbulence, friction coefficient.

The motion of the fluid through pipes, hydro-mechanical calculation results and integral flow characteristics of the pressure drop with the intensification for optimal selection of process equipment.

Введение

Протекание множества промышленных технологических процессов сопряжено с перемещением жидкостей по трубопроводам круглого сечения. Разнообразные жидкости перемещаются на большие расстояния по нефтепроводам, трубопроводам для подачи воды, в трубках теплообменников, в топливных системах всевозможных двигателей, проточных частях технологических установок и так далее. Трубопроводы по требованиям технологии могут быть расположены горизонтально, вертикально и под углом к поверхности земли. Для перемещения жидкости необходимо создать перепад давлений, который заставит ее перемещаться. На параметры течения будет влиять множество факторов, включающих свойства самой жидкости (плотность, вязкость), характеристики трубопровода (состояние внутренней стенки, шероховатость, наличие загрязняющих отложений) и условия создания движущей силы, то есть режимные параметры технологического оборудования. С точки зрения уменьшения энергетических затрат целесообразно использовать турбулентный режим течения.

При турбулентном режиме течения жидкостей по каналам возникает два ярко выраженных участка: начальный и участок основного развитого течения. На начальном участке из-за «прилипания» частиц жидкости к стенке канала образуется и развивается так называемый пограничный слой, толщина которого увеличивается вниз по течению и на некотором расстоянии от входного сечения становится равной радиусу канала. По мере продвижения потока жидкости, вдоль канала толщины гидродинамического и теплового пограничных слоев увеличиваются, что приводит к увеличению динамической толщины вытеснения, возрастанию скорости в ядре потока и падению статического давления по длине канала. При увеличении толщины динамического пограничного слоя уменьшается поперечный градиент скорости, вызывая заметное уменьшение касательных напряжений на стенке.

После смыкания пограничных слоев в канале начинается развитое стабилизированное турбулентное течение.

Для расчета параметров пограничного слоя, определяющих дальнейшее течение жидкости в канале, необходимо выбрать его модель. Наиболее известны двух- и трехслойная модели пограничного слоя, принадлежащие Т. Карману и Л. Прандтлю. Трехслойная модель достаточно сложна и, в отличие от двухслойной, учитывает в пограничном слое наличие не только вязкого подслоя и зоны с развитым турбулентным ядром, граничащей с основным потоком, но и наличие переходной зоны между ними.

Двухслойная модель, предложенная Прандтлем, достаточно проста и, вместе с тем, хорошо отражает физику протекания сложных гидродинамических процессов при течении жидкостей в каналах круглого сечения. Она отвечает запросам различных методов исследования, применяемых в современной науке для описания нестационарных течений.

Нестационарным называют течение с изменяющимся во времени значением расхода. Это изменение может быть периодическим, т.е. пульсирующим, когда одинаковые значения расхода повторяются с определенной частотой, и непериодическим, когда поток ускоряется или замедляется. Создание явлений нестационарности используется для интенсификации технологического процесса течения жидкостей.

Режимные методы интенсификации заключаются в изменении гидродинамических условий и режимов течения жидкостей в каналах. Для внедрения интенсификации для данного процесса необходимо исследовать процесс, зависимость гидравлических сопротивлений от режима интенсификации процесса, найти наиболее экономичный режим протекания процесса, провести исследование всех положительных и отрицательных эффектов, возникающих при интенсификации. Все это позволит определить эффективность метода и найти оптимальные режимы его осуществления.

Метод интенсификации процесса может быть комплексным, то есть сочетать в себе действие нескольких интенсифицирующих факторов. Суммарная степень интенсификации зависит от физической сущности эффектов и избранного режима работы установки. Суммарный эффект можно проанализировать теоретически, но сделать

точные предсказания практически невозможно. То есть можно составить представление о физической модели процесса, математическую же модель, построенную на основании предсказанной физической модели, необходимо проверять экспериментально.

При выборе оптимальных режимов комплексной интенсификации должна учитываться экономическая целесообразность каждого эффекта. Общая эффективность метода определяется алгебраической суммой эффективности отдельных эффектов.

Всестороннее исследование параметров течения в результате интенсификации предполагает наличие адекватной математической модели. В результате математического эксперимента возможно получение качественной и количественной информации по влиянию колебания расхода жидкости на продольный градиент давления, коэффициент трения, интегральные и кинематические характеристики потока, эволюцию их в функции продольной координаты.

Существует два способа расчета нестационарных течений: первый основан на применении одномерных моделей течения, а второй использует двух- и трехмерные модели. Одномерный способ описания течения применяется при расчете нестационарных турбулентных течений в сложных термогазодинамических условиях.

Двух- и трехмерные модели расчета гидромеханики потоков базируются на основных положениях теории пограничного слоя и являются более корректными, чем одномерные модели. В качестве исходной в этих способах используется система дифференциальных уравнений, в которую всегда входит уравнение количества движения. Уравнения могут быть записаны относительно локальных, усредненных каким-либо способом параметров пограничного слоя, либо интегральных, например, толщин вытеснения, потери импульсов и т. д.

Если методы используют систему уравнений первого типа, то они называются дифференциальными, если второго – интегральными. Т. е. принципиальное отличие дифференциальных и интегральных моделей состоит в том, что в интегральных моделях теорема импульсов является удовлетворительной для всего пограничного слоя, а в дифференциальных – еще и для каждой точки пограничного слоя в отдельности. Дифференциальные и интегральные методы имеют свои преимущества и недостатки. В дифференциальных методах допущений, используемых для замыкания исходной системы уравнений, меньше, но их алгоритмы сложны, и трудно добиться устойчивости и сходимости разных систем. В интегральных методах применяется большее количество эмпирических соотношений, но они обладают простотой расчета, что является крайне важным для инженерной практики.

Решение

В данной работе используются именно интегральные методы. Используются полуэмпирические теории турбулентности, на базе которых построены параметрические методы расчета. Математическая модель основана на классической теории пограничного слоя [2].

Рассматривается нестационарное движение однофазного несжимаемого потока в осесимметричном канале.

Нестационарность течения является результатом изменения расхода по гармоническому закону. Расход жидкости на входе в канал меняется во времени. Профили скоростей осесимметричны.

Система дифференциальных уравнений включает:

уравнение движения

$$\rho\frac{\partial w_z}{\partial t}+\rho w_r\frac{\partial w_z}{\partial r}+\rho w_z\frac{\partial w_z}{\partial z}= \\ =k\rho g_z-\frac{\partial P}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\tau_z)}{\partial r}; \qquad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial\rho w_z}{\partial z}+\frac{\partial\rho w_r}{\partial r}+\frac{\rho w_r}{r}=0; \qquad (2)$$

уравнение энергии

$$\rho\frac{\partial h}{\partial t}+\rho w_z\frac{\partial h}{\partial z}+\rho w_r\frac{\partial h}{\partial r}=\frac{1}{r}\frac{\partial(qr_z)}{\partial r}+\frac{\partial P}{\partial t}. \qquad (3)$$

где $\boldsymbol{k}$ – единичный вектор, направленный вертикально вверх. Он определяет знак члена ρg_z при движении жидкости вверх или вниз.

Данные уравнения можно записать в интегральном виде как уравнение неразрывности в плоском приближении

$$4H\,Re^{**}=Re_{01}(W_0-1); \qquad (4)$$

уравнение движения

$$\frac{dW_0}{dZ}=\frac{Re_{01}\left(C_g+\frac{C_f}{2}\right)+\overline{\overline{P}}}{\frac{Re_{01}}{4H}+\frac{Re^{**}}{W_0}(2+H)}; \qquad (5)$$

с условиями совместности:

$$\frac{dW_0}{dt}=\frac{Re_{01}\left(C_g+\frac{C_f}{2}\right)+\overline{\overline{P}}}{\frac{2r_0}{W_0w_{01}}\frac{Re_{01}}{4H}} \qquad (6)$$

Полученная система интегральных уравнений решается численным методом. Для численной реализации уравнений (4-5) вышеуказанным интегральным методом на первом этапе проводится их интегрирование с учетом принятых в теории пограничного слоя понятий толщин вытеснения $\delta^*=\int_0^\infty\left(1-\frac{\rho w_z}{\rho_0 w_0}\right)dy$ и потери импульсов $\delta^{**}=\int_0^\infty\frac{\rho w_z}{\rho_0 w_0}\left(1-\frac{w_z}{w_0}\right)dy$,

учитывающих смещение линий тока из-за наличия вязкости и потерю количества движения на преодоление трения соответственно. Замыкание системы уравнений осуществляется с помощью выражения для закона трения.

Законы трения и теплоотдачи, необходимые для замыкания системы уравнений (1-3), могут быть получены на основе параметрических методов, разработанных Кутателадзе С.С. и Леонтьевым А.И. Их суть заключается в изучении влияния на пограничный слой каждого отдельного возмущающего фактора с последующим исследованием их совместного влияния и установлением функциональных связей между ними.

Соотношение для закона трения, полученное на основе гипотезы турбулентности Прандтля, необходимое для замыкания исходной системы уравнений:

$$\sqrt{C_f/2} = (1-w_1) \Big/ \int_{\xi_1}^{1} \sqrt{\frac{\bar{\tau}}{\bar{\tau}_0}} \frac{d\xi}{\chi\xi} \qquad (7)$$

Для его определения с использованием двухслойной модели пограничного слоя необходимо рассчитать безразмерную скорость (8) и толщину на границе вязкого подслоя (9):

$$w_1 = Re^{**} \frac{\delta}{\delta^{**}} \frac{C_f}{2} \xi_1 \left(1 + \frac{\bar{\tau}'_w \xi_1}{2}\right) \qquad (8)$$

$$\xi_1 = \eta_1 \left[Re^{**} \frac{\delta}{\delta^{**}} \sqrt{\frac{C_f}{2}\left(1 + \frac{\bar{\tau}'_w \xi_1}{2}\right)} \right]^{-1} \qquad (9)$$

Закон трения в турбулентном пограничном слое может быть получен на основе граничных условий. Вид полинома для его расчета определяется знаком производной касательных напряжений на стенке. Если $\bar{\tau}'_w > 0$,то применяют аппроксимацию, предложенную Федяевским К.К. [8].

$$\bar{\tau} = a + b\xi + c\xi^2 + d\xi^3 \qquad (10)$$

в случае, когда $\bar{\tau}'_w < 0$, лучшую сходимость с экспериментом имеет полином Фафурина А.В. [3]:

$$\bar{\tau} = a + b\xi + c\xi^d \qquad (11)$$

где $\xi = y/\delta$ - безразмерная поперечная координата пограничного слоя.

В условиях течения, исследуемых в настоящей работе, на параметры потока оказывают влияние гидродинамическая нестационарность, положительный и отрицательный продольные градиенты давления, которые по-разному сказываются на распределении касательных напряжений в пределах пограничного слоя и в целом на пристеночном трении. Влияние первых трех факторов учитывается параметром трения $\bar{\tau}'_w$, величина которого может быть определена по зависимостям (10, 11).

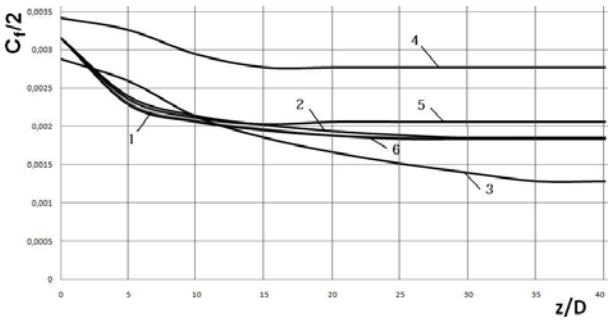

Рис. 1 – Развитие коэффициента трения в трубопроводе круглого сечения

В результате расчета основных параметров потока по принятой математической модели с учетом эффектов нестационарности, возникающих при интенсификации процесса течения жидкости, были получены следующие закономерности изменения этих параметров: коэффициент трения (рис. 1), толщина вязкого подслоя, скорость на границе вязкого подслоя, параметр гидродинамической нестационарности в трубе. Из графиков видно, что стабилизация гидродинамических и кинематических параметров происходит на расстоянии 20-30 калибров от входа в канал. Далее поток имеет развитое турбулентное течение.

Основной параметр, определяющий энергоэффективность процесса перемещения жидкостей по каналам, это потери давления на трение.

Потери давления можно рассчитывать по трем методикам: по стационарной с использованием соотношения Дарси-Вейсбаха, рассчитывая коэффициент сопротивления по Блазиусу; по квазистационарной, когда течение рассматривается в виде последовательности стационарных состояний; по нестационарной, учитывая деформацию пространственно-временных величин при изменении граничных условий во времени по соотношению:

$$\Delta P_{C_f} = 4 \frac{C_f}{2} \rho_0 w_0^2 \qquad (12)$$

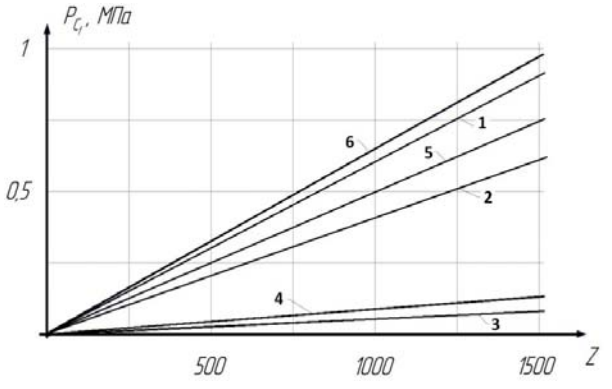

Рис. 2 – Потери давления на трение при негармонических колебания в осесимметричном канале

По результатам работы [1] использование для расчета стационарной методики занижает полученный показатель потерь давления за счет пристеночного трения на 37%. По нестационарной методике были получены следующие результаты расчета потерь давления на трение (рис. 2). Как видно из графика, потери давления растут по длине канала, что согласуется с физической картиной течения жидкостей. Результаты, приведенные в приложениях (1-6) были получены при создании в трубе круглого сечения негармонических колебаний.

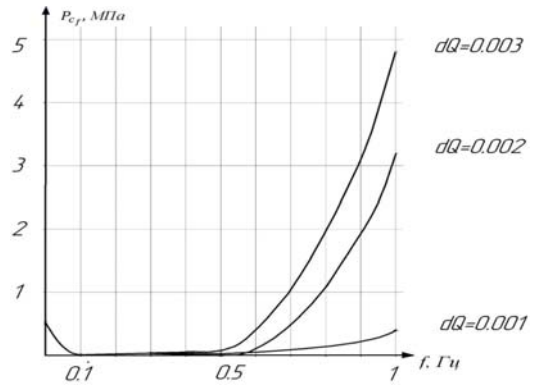

Рис. 3 – Потери давления на трение при гармонических колебаниях в осесимметричном канале

Применение гармонических низкочастотных колебаний ведет к снижению потерь давления на трение по длине канала при частотах от 0,05 Гц до 0,5 Гц на 64% по сравнению с потерями при частоте колебаний от 1 Гц и выше (рис.3) [9].

Технические факторы

Гидродинамическая устойчивость – это способность течения сохранять свою структуру и режим при наличии возмущающих факторов, то есть будучи ламинарным, не турбулизироваться, а будучи турбулентным, не ламинизироваться.

Результаты исследований устойчивости нестационарных течений не всегда согласуются между собой по причине сложности исследований и имеют в основном эмпирический характер[10,11].

Анализ устойчивости нестационарных течений провести значительно сложнее, чем анализ установившихся течений, так как и параметры течения, и воздействующие на них возмущения меняются во времени. Основная трудность заключается в выборе критерия неустойчивости, так как только рост показателя возмущающего фактора не может являться достаточным условием неустойчивости течения.

Если нестационарное течение неустойчиво, то даже малые возмущения, наносимые потоку жидкости, не затухают со временем, а нарастают, вызывая таким образом необратимые изменения в структуре потока.

Существуют понятия абсолютной и конвективной неустойчивости. При абсолютной неустойчивости процессы нарастают во времени, постепенно, охватывая всю систему, при конвективной – в пространстве, так как нарастающие возмущения сносятся к выходу из системы. При отсутствии отраженных волн все возмущения могут покинуть систему, не достигнув критической величины.

Нарастание возмущений во времени рассматривают обычно с теоретической точки зрения. На практике реализуют периодические во времени возмущения.

Наибольшее значение числа Рейнольдса, при котором все возмущения затухают, называется критическим. Расчет критического числа Рейнольдса – одна из важнейших задач теории гидродинамической устойчивости, так как оно определяет области, в которых параметры течения таковы, что оно обладает свойством гидродинамической устойчивости при малых возмущениях.

В классической гидравлике течение считается турбулентным при $Re=10^4$.На практике режим течения может быть турбулентным при значительно более низких числах *Re*. Безразмерное число *Re* зависит от параметров потока, в том числе, от его скорости. При турбулентных течениях увеличение скорости течения жидкости в ядре потока приводит к тому, что профиль скорости становится более заполненным и «поджимает» пограничный слой, увеличивая касательные напряжения, а значит, и потери давления на трение.

Устойчивость турбулентного режима течения при малых скоростях потока можно поддерживать путем создания пульсаций расхода жидкости. Энергия механических колебаний может сообщаться обрабатываемой среде извне по-разному. Для этого может использоваться:

1) весь аппарат;

2) часть аппарата (дно, стенка и др.);

3) рабочий орган, помещенный внутрь аппарата;

4) поршневой или мембранный пульсатор, находящийся вне аппарата, и соединенный с ним.

Способ создания колебаний существенно влияет на характеристики этих колебаний, их эффективность и затраты энергии на их генерацию. Чтобы исключить необходимость использования рабочего органа со значительной массой и большими инерционными нагрузками, ограничивающими диапазон колебаний и увеличивающими расход энергии на их генерацию, целесообразно для создания колебаний рабочей жидкости применять пульсационный аппарат с частотным программным управлением электропривода насоса. Такое аппаратное исполнение позволяет создавать колебания без потерь энергии на преодоление силы трения, возникающей при перемещении рабочего органа.

Финансовые факторы

Применение низкочастотных гармонических пульсаций, помимо выигрыша по потерям давления на трение, ведет к снижению мощности

насоса, требуемой для перекачки жидкости, а также снижает частоту использования оборудования, обеспечивающего периодическое изменение расхода.

При наложении пульсаций извне, расход энергии, затрачиваемой насосом на прокачивание жидкости по трубопроводу, уменьшается на величину, которая расходуется пульсатором на генерацию пульсаций, за вычетом необратимых потерь, которые на практике оказываются небольшими. Таким образом, значительная часть энергии, затраченной на генерацию пульсаций, компенсируется уменьшением расхода энергии насосом, прокачивающим жидкость через аппарат.

С помощью пульсаций можно не только увеличить производительность и обеспечить компактность аппаратуры, но и значительно повысить качество выпускаемой продукции за счет сокращения времени обработки [4, 5, 6], а также увеличить межремонтный интервал задействованного в технологическом процессе оборудования. Стоит отметить еще один положительный фактор, имеющий большое значение при транспортировке капельных жидкостей: применение пульсаций уменьшает количество отложений различного вида на поверхности аппаратов и трубопроводов [7].

Таким образом, совокупное воздействие всех вышеуказанных положительных эффектов ведет к снижению капитальных вложений и срока окупаемости оборудования.

Выводы

1. Проведение современных научных исследований требует использования для моделирования адекватной математической модели, дающей хорошую сходимость результатов моделирования с опытными данными. Двухслойная модель пограничного слоя в достаточной мере отражает физику протекания сложных гидрогазодинамических процессов.

2. Выбор оптимальных режимов комплексной интенсификации должен учитывать экономическую целесообразность каждого эффекта. Суммарная степень интенсификации зависит от физической сущности эффектов и избранного режима работы установки.

3. Использование интегральных методов совместно с полуэмпирической теорией турбулентности, на базе которых построены параметрические методы расчета, позволяют количественно оценить действие каждого интенсифицирующего фактора и установить функциональные связи между эффектами интенсификации.

4. Расчет потерь давления с учетом эффектов нестационарности позволяет выбрать технологическое оборудование для оптимального осуществления конкретного производственного процесса.

5. Применение для интенсификации гармонических колебаний по сравнению с негармоническими позволяет существенно сократить потери давления на трение по длине канала.

Литература

1. Богданова Н.В. Энергосберегающие режимы пульсационной очистки нефтяных скважин жидкофазными реагентами. / Н.В. Богданова – Казань: Казан.гос. энерг. ун-т, 2011. – 172 с.
2. Кутателадзе С.С. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. / С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев. // М.: Энергия.- 1972. – 342 с.
3. Фафурин А.В. Законы трения и теплоотдачи в турбулентном пограничном слое// В сб.: Тепло- и массообмен в двигателях летательных аппаратов. Казань: КАИ, 1979. Вып. 2. с. 62-69.
4. Федоткин И.М., Заец А.С. «Изв. Вузов. Энергетика», 1968, №5, 93.
5. Федоткин И.М., Заец А.С. «Изв. Вузов. Пищевая технология», 1968, №5, 120.
6. Федоткин И.М., Заец А.С. «Изв. Вузов. Энергетика», 1968, №11, 72.
7. Федоткин И.М., Заец А.С. «Сахарная промышленность», 1969, №4, 44.
8. Федяевский, К.К. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости. / К.К. Федяевский, А.С. Гиневский, А.В. Колесников. // Л.: Судостроение. – 1973. – 256 с.
9. Самойлов А.В., Богданова Н.В., Ковалевский Е.А. Снижение энергозатрат при прокачке рабочих агентов и транспортировании готового продукта. // Электронный сборник научных трудов: «Интеграция мировых научных процессов как основа общественного прогресса», 2013. Вып. 8, ч.3.
10. Минибаева Л.Р. Численное моделирование гидродинамической структуры потока в аппарате с перемешивающими устройствами / Л.Р. Минибаева, А.Г. Мухаметзянова, А.В. Клинов // Вестник Казан. технолог. ун-та.-2008.- №6. – Ч.1. С. 191-198.
11. Снигерев Б.А. Течение упроговязкой жидкости со свободной поверхностью/ Б.А. Снигерев, Ф.Х. Тазюков // Вестник Казан. технолог. ун-та. – 2007. - №1. С.85-92.

© **В. В. Плотников** – канд. техн. наук, доцент каф. АСС и ОИ, КНИТУ, carpenter_wowa@mail.ru; **Н. В. Богданова** – канд. техн. наук, доцент каф. АТПП, КГЭУ; **А. В. Самойлов** – студент каф. «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», КГЭУ.

© **V. V. Plotnikov** – k. t. n., docent, dep. ASS&OI, KNRTU, carpenter_wowa@mail.ru; **N. V. Bogdanova** – k. t. n., docent, dep. ATPP, KSEU; **A. V. Samojlov** – student, KSEU.