

площади до 500 см² их рост может составить 70 % (с 48 до 90 МПа), но они не превышают допускаемых 155 МПа.

Вывод. При длительной эксплуатации потеря несущей способности рамы вагона не превышает 12 % от исходного состояния, а кузова по нижнему поясу – 35 %, и напряжения не выходят за пределы допускаемых значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колес 1520 мм (несамоходных).** – М. : ГОСВНИИВ–ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

S. V. MAKEYEV

SIMULATION OF STRAINED CONDITION FOR RAILWAY PASSENGER CARRIAGE BODY CAUSED BY CORROSIVE WEAR

There is considered the stress-strain condition for passenger carriage because of working load effects under nominal dimensions and net corrosive wear of main load-bearing elements of the frame and body according to the results of measurements performed at diagnosis.

Получено 29.03.2010

**ISBN 978-985-468-924-1. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 5. Гомель, 2011**

УДК 532.5

М. Г. МЕЛКОЗЕРОВ, А. В. ДЕЛКОВ, А. А. ХОДЕНКОВ
*Сибирский государственный аэрокосмический университет,
имени академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия*

К ВОПРОСУ ОБ АНАЛИЗЕ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ

Рассмотрены основные методы анализа двухфазных газожидкостных потоков, описана разработанная авторами модель гетерогенного течения двухфазного закрученного потока, оценены результаты исследований.

С двухфазными течениями приходится сталкиваться практически во всех областях техники (например, в трубчатых испарителях, реакторах с кипящей водой, системах продувки котлов, нагревателях, кипятильниках, газлифтных насосах, нефтяных и геотермальных скважинах, нефте- и газопроводах, рефрижераторах, технологических трубопроводах, конденсаторах и т. д.).

Такие потоки всегда имеют не только фиксированные внешние границы (стенки каналов, поверхности обтекаемых тел), но и внутренние поверхно-

сти раздела. Поверхности раздела двух сред в общем случае меняются в пространстве и во времени. На поверхности раздела фаз возникают особые силовые взаимодействия. Эти взаимодействия самым существенным образом сказываются на поведении потока.

В зависимости от составляющих фазы веществ двухфазные газожидкостные смеси делят:

- на однокомпонентные, где фазы составляют агрегатные состояния одного вещества (аммиак и его пары);
- двухкомпонентные, где фазы составляют разные вещества (смеси типа «вода–воздух»).

При отсутствии фазовых переходов течение однокомпонентной смеси подчиняется тем же законам, что и течение двухкомпонентной.

Двухфазные течения подчиняются всем основным законам гидромеханики. Однако уравнения более сложны и многочисленны, чем в случае однофазных течений. Если рассматривать движение одиночного пузыря или движение потоков с непрерывной фиксированной границей раздела фаз, то формулировка основной системы уравнений еще может быть произведена с необходимой строгостью. Если же течение сложное, компоненты потока расчленены на отдельные элементы, имеется ряд областей, замкнутых границами раздела – где возникают трудности, связанные с необходимостью рассматривать вероятностные ситуации с элементами, переменными в пространстве и времени. Последовательные аналитические методы для таких систем в настоящее время отсутствуют. Решающее значение имеют эксперимент и методы подобия [1].

Несмотря на значительный объем исследований по двухфазным течениям, имеется немало случаев, когда погрешности прогноза по ранее выведенным формулам достигают 50 %. Высокая неопределенность прогноза связана с большим числом переменных, характеризующих двухфазное течение. Потребовалась бы чрезвычайно обширная программа исследований для получения надежных эмпирических корреляций. Следует отметить, что имеющиеся знания о двухфазном течении в значительной степени являются эмпирическими.

Основные переменные, характеризующие двухфазное течение:

- массовый расход,
- расходное массовое газосодержание,
- плотности и вязкости жидкости и газа,
- поверхностное натяжение,
- шероховатость внутренней поверхности трубы,
- наклон трубы к горизонту.

Ввиду большого числа основных переменных получение эмпирических корреляций для двухфазных потоков – крайне трудоемкая задача, поэтому часто пользуются полуэмпирической корреляцией.

Структура и характер распределения фаз в двухфазном газожидкостном потоке оказывают существенное влияние на особенности протекания процессов взаимодействия между фазами. Как показывают результаты исследований, со структурой двухфазного потока неразрывно связаны такие характеристики потока, как гидравлические потери давления, потери энергии из-за механического взаимодействия фаз, особенности распространения возмущений в потоке и др. От особенностей структуры двухфазного потока зависит также возможная схематизация процесса течения, выбор формы уравнений и методов, применяемых для исследования течения. Очевидно, что при расслоенной структуре течения, когда имеет место четкая граница раздельного существования фаз, могут быть использованы уравнения движения каждой из фаз в отдельности с учетом описания процессов на поверхности раздела. Подобный метод трудно применим для пузырькового режима течения, когда основная энергия потока сосредоточена в несущей жидкой фазе и распределенные в ней газовые пузырьки являются лишь источником диссипативных потерь, возникающих при относительных перемещениях поверхности раздела. Вместе с тем структура потока, распределение пузырьков по размерам оказывают влияние на характер и скорость протекания процессов обмена массой, теплом и количеством движения между фазами.

Эти обстоятельства делают необходимым определение не только состава двухфазного потока, т. е. относительной концентрации фаз, но и характера ее распределения как по длине и сечению трубопровода, так и по размерам пузырьков, составляющих газовую фазу. Вместе с тем, следует отметить, что и сама структура двухфазного потока определяется гидродинамическими характеристиками потока.

Для получения газожидкостной смеси желаемых физических свойств необходимо задаться параметрами, которых, как отмечено выше, более десяти. Если ещё учесть условия формирования газожидкостных смесей (способы дробления газовой фазы, условия выделения газа из раствора и т.п.), то станет понятным бесконечно большое их разнообразие.

Тем не менее, для конкретизации объекта изучения и установления границ между отдельными видами структур газожидкостных смесей, обладающих резко различными физическими свойствами, большинство исследователей указывает четыре основных типа структур (рисунок 1):

– *эмульсионная (пузырьковая) структура* (рисунок 1, а), характеризующаяся более или менее равномерным распределением газа в жидкости и низким газосодержанием. Газ находится в жидкости в виде отдельных пузырьков (меньших диаметра трубы). Размеры пузырьков, а также расстояния между ними могут быть различными. Эмульсионные структуры характеризуются сравнительно малыми относительными скоростями газа в жидкости;

– *четочная (снарядная) структура* (рисунок 1, б) наблюдается при больших газосодержаниях. При таких структурах основная масса газа движется в виде четок, перекрывающих всё сечение трубы и чередующихся с прослойками жидкости. Размеры и взаимное расположение газовых включений могут быть различны;

– *волновая структура* (рисунок 1, в). Такая структура имеет место в горизонтальных или слабо наклонных трубопроводах при больших газосодержаниях, когда жидкая фаза занимает нижнюю часть живого сечения потока, а газ перемещается как в виде пузырьков в жидкости, так и в виде сплошного потока газа в верхней части живого сечения потока;

– *стержневая (кольцевая) структура* (рисунок 1, г). При таких структурах основная масса газа движется в осевой части трубы сплошным потоком (стержнем), жидкость же движется по стенкам в виде тонкого кольцевого слоя. Стержневые структуры характеризуются высокими газосодержанием и относительными скоростями газа (более 1,2 м/с).

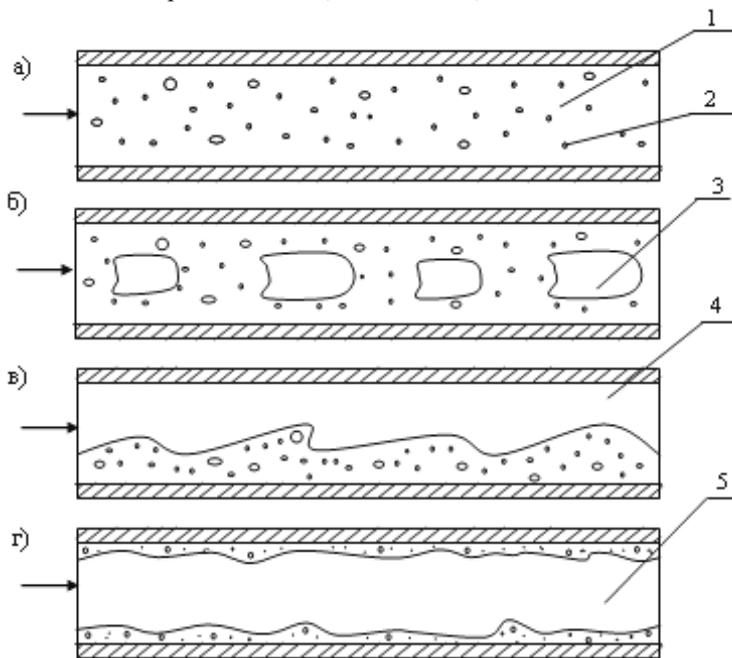


Рисунок 1 – Режимы напорного газожидкостного потока (1 – жидкость; 2 – пузырёк газа; 3 – газовая пробка в виде снаряда; 4 – поток газа над волнистой поверхностью жидкой фазы; 5 – поток газа в кольцевом сечении потока жидкости)

Основа теории двухфазного течения существует в классической механике жидкости и газа, которая детально описывает движение каждой фазы. Однако её современное состояние таково, что применение строгих выводов из фундаментальных соотношений, таких, как уравнения Навье-Стокса, является невозможным из-за ненадёжности расчётов двухфазных течений. Совокупность факторов, создающая это положение таково: бесконечное разнообразие геометрических форм межфазной поверхности и режимов течения; разнообразные формы неравности, например образование пузырей при фазовом переходе; сильное влияние небольших количеств примесей, малых изменений геометрии, которая может привести к более раннему отрыву потока жидкости.

После того, как приняты исходные допущения, акцент переносится на методы решения системы уравнений, а не на оценку достоверности, с которой математическая схема может описать физику двухфазного течения.

Существует несколько методов анализа двухфазных течений.

Первый подход к анализу двухфазного течения – описательно-экспериментальный. Он заключается в процессе наблюдения и попытке объяснения происходящих явлений на основе описания таких наблюдаемых характеристик как режим течения, и регистрации зависимости измеряемых параметров от независимых переменных, например, перепада давления от расхода.

Метод корреляция – простейшая форма анализа, в которой закономерности в поведении экспериментальных данных выражены количественно преимущественно с помощью безразмерных, физически обоснованных комплексов. В частности, если явление сложно (например, турбулентность в однофазном течении), то для такого параметра, как коэффициент трения, корреляция является наиболее полезным результатом исследования.

Один из теоретических методов – это модель гомогенного течения. Реальный двухфазный поток является потоком, разделённым на области с существенно различными свойствами. Гомогенная теория двухфазных течений – это попытка представить течение в виде однофазного, используя уже разработанные методы. Позволяя получить удовлетворительное представление о таких переменных, как перепад давления при дисперсно-кольцевом течении, эта теория для того же течения, рассматриваемого в другом контексте, например в случае высыхания плёнки жидкости на обогреваемой поверхности, оказывается несостоятельной, так как связанное с этим процессом ухудшение теплоотдачи зависит от той доли жидкой фазы, которая течёт по стенке в виде плёнки.

В модели раздельного течения (иногда называемой моделью или теорией гетерогенного течения [2]) каждая фаза обладает собственными свойствами

(температурой, плотностью, скоростью) и должна удовлетворять некоторой форме обычных законов сохранения массы, импульса и энергии. Каждый параметр представляет собой некоторую среднюю величину. Осреднение порождает ошибки, которые корректируются путём введения дополнительных членов или коэффициентов в уравнения.

Теория раздельного течения может оказаться удачным представлением газового потока с каплями, образующимися при разбрызгивании, или кольцевого течения без уноса капель.

При выводе уравнений сохранения в известных пределах имеется свобода выбора в определении одних членов как основных, а других как эмпирических. Особенно это относится к межфазовым взаимодействиям. Выбор формы уравнений может влиять на характер решения. При этом форма уравнений изменяется вместе с изменением режима течения. А чтобы можно было учесть все режимы течения и поправочные коэффициенты требуется очень большая эмпирическая информация. Единственным критерием является полезность для той конкретной цели, для которой выполняется анализ. Все альтернативы требуют экспериментальной проверки. Простые уравнения существуют редко и относятся лишь к сильно идеализированным моделям, которые являясь геометрически простыми и в лучшем случае служат приближением для гораздо более сложной реальной ситуации.

Авторами была предпринята попытка анализа поведения двухфазного закрученного потока в центробежном сепараторе. Структура такого потока определяется центробежными силами инерции, которые в присутствии плотностной неоднородности приводят к четкому разделению фаз. С подобными процессами можно столкнуться в сепараторах и гидроциклонах-деаэраторах. В предположении устойчивой границы раздела уже в плоскости ввода применялась методика анализа по модели гетерогенного течения. Фазы отдельно описывались законами сохранения, а учет их взаимодействия велся через силовой баланс на границе раздела.

Полученная система уравнений для газовой и жидкой фазы является замкнутой и определяет параметры газожидкостного потока в любом сечении, если известно динамическое давление жидкости в окружном направлении.

Чтобы перейти при интегрировании от рассматриваемого сечения к последующему, необходимо определить изменение динамического давления на шаге. Очевидно, что оно будет уменьшаться, т.к. закрученный поток под действием вязкости будет терять свою закрутку.

Потери динамического давления обусловлены трением в пограничном слое. Основной характеристикой пограничного слоя является толщина потери импульса, которая зависит от полной скорости.

Для проверки этой математической модели проводились эксперименты с закруткой двухфазной смеси из водопроводной воды и воздуха (рисунок 2). Результаты подтвердили адекватность модели. В настоящее время ведется работа по созданию подобных моделей для течений со сложными структурами.

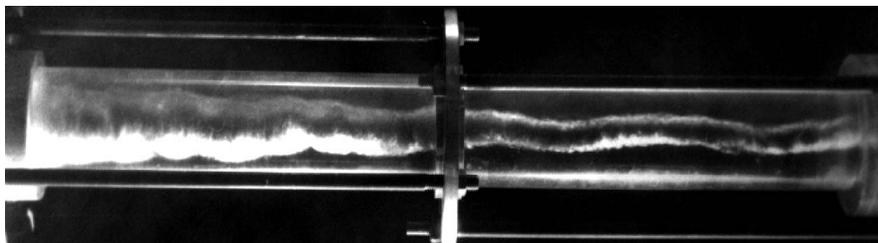


Рисунок 2 – Структура двухфазного закрученного потока (массовый расход жидкости – 0,51 кг/с, газа – $3,45 \cdot 10^{-4}$ кг/с, содержание газа в потоке составляет 0,07 %)

Дальнейшее изучение закономерностей течения, тепло- и массообмена двухфазных газожидкостных потоков, систематизация этих данных и разработка универсальных методов расчёта таких течений являются актуальной научной и прикладной проблемой. Результаты этих исследований найдут широкое использование в различных областях техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кутателадзе, С. С. Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
- 2 Чисхолм, Д. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках / Д. Чисхолм. – М.: Недра, 1986. – 432 с.

M. G. MELKOZEROV, A. V. DELKOV, A. A. KHODENKOV **ON THE ISSUE OF TWO-PHASE GAS-LIQUID FLUX CREEP ANALYSIS**

The article considers the main methods of two-phase gas-liquid flux creep analysis, the model of two-phase heterogeneous swirling flow created by the authors is described and the research results are evaluated.

Получено 23.04.2010