5. Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: уч. Пособие. – Екатеринбург. – 2004. – 257 с.
6. Фаерман В.А., Степанцов П.С., Аврамчук В.С. Структурные и функциональные особенности современных вибродатчиков // сб. труд. XI Международной научно-практ. конф. студентов, аспирантов и мол. уч. «Молодёжь и современные информационные технологии. – Томск, 2013. – С. 221-223.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ТЕЧЕНИЯ ПЕН В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Нго Тхань Тхао
Научный руководитель, профессор С. Н. Харламов
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Пены относятся к дисперсным системам и состоят из множества газовых пузырей, распределенных в жидкой матрице. Чистые жидкости вспенить не удается – пленки чистой жидкости мгновенно разрушаются. Чтобы увеличить время жизни пузырей в пене, в жидкость добавляют поверхностно-активные вещества (ПАВ) типа лаурилсульфата натрия и т.п., которые уменьшают поверхностное натяжение раствора и организуют, в силу физико-химических взаимодействий молекул, дополнительное отталкивание между поверхностями пленок пены.

Обычно выделяют два типа пен. Первый класс подобен эмульсии газа в жидкости и состоит из системы почти сферических пузырей, рассеянных в объеме жидкой фазы. Ко второму типу пен относятся так называемые полиэдрические пены, то есть системы пузырей, разделенных тонкими жидкими пленками, которые, в свою очередь, образуют достаточно правильные решетки. Тонкие пленки, разделяющие пузыри, обычно называют ламеллами. Пузыри в полиэдрической пене имеют форму многогранников и могут отличаться по размеру и числу соседних пузырей – многогранников (полиэдров), сформированных ламеллами. Ламеллы, отделяющие неравные по размеру пузыри, могут искривляться из-за различия давления в пузырях [2].

Образование пены в основном обеспечивается в механизме гидродинамической неустойчивости течений в пористых средах. При условии, что между входом и выходом в модели пористой среды существует перепад давления в диапазоне от 0,05 МПа до 0,1 МПа, то в процессе вытеснения газом пенообразующего раствора возникают сильные флуктуации скорости течения в порах в связи с геометрической неоднородностью поровых и трещиноватых каналов (диаметры пор колеблются в диапазоне от 10 мкм до 250 мкм). Пена, получающаяся продуванием воздухом через каналы пористой среды, насыщенной раствором ПАВ, имеет размер, близкий к размерам пор, также характеризуется сравнительно невысоким гидродинамическим сопротивлением [2].

Рассмотрим идеальную капиллярную систему подобно двум несмешивающимся жидкостям типа газа и воды. В силу того, что зерна матрицы имеют различную кривизну, жидкость находится в поле действия лапласовского капиллярного давления, действующего на изогнутые поверхности раздела газ-жидкость, а также под действием расклинивающего давления, действующего в смачивающих пленках. В силу локальных неоднородностей порового пространства в жидкости устанавливаются локальные градиенты давления, ведущие к перетокам жидкости. Эти локальные течения жидкости приводят к выравниванию давления и установлению у менисков постоянной кривизны. Из-за сложной структуры реальных пористых сред смачивающая фаза может существовать в них в различном термодинамическом состоянии: как обычная объемная жидкость, сосредоточенная в менисках, так и в виде тонких пленок, покрывающих поровую поверхность. Смачивающие пленки на стенках пор с изменяющейся кривизной вынуждены иметь различную кривизну и толщину, чтобы сбалансировать расклинивающее и капиллярное давления.

Допустим, что пена закачивается в образец длиной H и высотой d при постоянной водонасыщенности. Для описания течения пены в этом случае можно пользоваться системой уравнений [3]:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0, \qquad \frac{\partial F}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial F}{\partial x} = -\frac{F}{\tau_r}, \qquad v = -k \cdot \frac{\partial P}{\partial x} - F \qquad (1, 2, 3)$$

Кинетическое уравнение (2) можно трактовать и с позиций механизма рождения-гибели ламелл, блокирующих газовые каналы. Действительно, уравнение (3) выражается баланс сил в движущемся пенонесущем газе. Вязкие силы уравновешены градиентом давления и распределенными по образцу блокирующими силами со стороны ламелл пены. В первом приближении блокирующая сила пропорциональна концентрации ламелл пены. Поэтому концентрация может быть выражена через L, и, считая, что ламеллы после своей гибели не восстанавливаются, можно трактовать уравнение (2) как кинетическое уравнение для концентрации ламелл пены. При такой трактовке параметр τ_r можно рассматривать как время жизни блокирующей ламеллы и он может быть выражен через собственно термодинамическое время жизни τ_t и гидродинамическое время устойчивого дрейфа ламеллы τ_h как

$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{\tau_t} + \frac{1}{\tau_h} \qquad (4)$$

Нужно ввести безразмерные переменные и функции следующим образом [3]:

$$P = \frac{P'}{P_{sc}}, \qquad L = \frac{F}{L_0}, \qquad \upsilon = \frac{v}{v_0}, \qquad T = \frac{t}{\tau_r}, \qquad X = \frac{x}{d},$$

где $P_{sc} = H^2/\tau_r k$ – масштаб давления, L_0 – масштаб эффективной внутренней силы, $v_0 = H/\tau_r$ – масштаб скорости. В этих переменных система уравнений принимает вид:

$$\frac{\partial \upsilon}{\partial X} = 0 \qquad \frac{\partial L}{\partial T} + \upsilon \cdot \frac{\partial L}{\partial X} = -L \qquad \upsilon = -\frac{\partial P}{\partial X} - b \cdot L, \qquad (5, 6, 7)$$

здесь параметр $b = L_0 \tau_r k/H$ - служит мерой отношения внутренних сил, возникающих при движении караванов пузырей, к вязким силам, учитывающим сопротивление эффективной матрицы при течении газа. В пределе $b \to \infty$ внутренние силы преобладают над вязкими, а в противоположном случае течение газа подчиняется обычному закону Дарси для газа без пены.

Опишем возможную экспериментальную ситуацию. В режиме заданного перепад давления граничные и начальные условия записываются как [1, 3]

$$P = P_0(T), L = 1, X = 0$$
$$P = 0, X = 1$$
$$P = 0, L = 0, T = 0$$

Для удобства решения системы уравнений, введем новую независимую переменную J', выполняющую роль времени:

$$\frac{d\sigma}{dT} = \upsilon(T), \sigma(0) = 0$$

Тогда решение уравнения переноса (7), полученное Корневом К.Г. [3] в новых переменных имеет вид

$$L = \varphi(\sigma - X) \cdot e^{\left[-\int_{\sigma - X}^{\sigma} \frac{d\beta}{V(\beta)}\right]} \qquad V(T) = \upsilon(\sigma) \qquad (8)$$

,

где $<p(и)$ – функция Хевисайда

$$\varphi(u) = \begin{cases} 0, u < 0 \\ 1, u = 0 \\ 2, u > 0 \end{cases}$$

Используя уравнение (8), исследуем два режима течения пены, интересных с практической точки зрения. Первый режим вытеснения соответствует распространению пены по образцу, тогда как второй описывает релаксацию системы к стационарному состоянию. Первая стадия течения описывается уравнением:

$$\upsilon(\sigma) = P_0(\sigma) - b \cdot \int_0^X -e^{\left[-\int_{\sigma - \sigma}^{\sigma} \frac{d\beta}{V(\beta)}\right]} dX \qquad \sigma < 1. \qquad (9)$$

Вторая – уравнением с конечными пределами интегрирования

$$\upsilon(\sigma) = P_0(\sigma) - b \int_{o - X}^{\sigma} -e^{\left[-\int_{\sigma - \sigma}^{\sigma} \frac{d\beta}{V(\beta)}\right]} dX \qquad \sigma > 1. \qquad (10)$$

.

Канн К.Б. [2] предлагал оценить качество пены в зависимости от её неустойчивости под действием совокупности внутренних и внешних сил по следующей формуле:

$$\frac{V_t}{V_0} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha \cdot t}}$$

где V_0 – объём жидкости, содержавшейся в пенях в момент $t = 0$; а – константа, определенная по экспериментам; V_t – оставшийся в пористой среде объём в момент t.

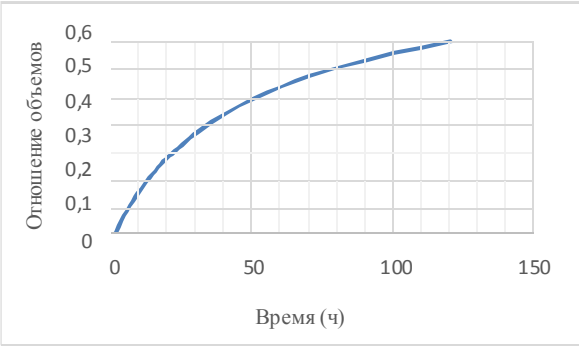

Рис. 1. Кривая вытекания жидкости из пен в зависимости от времени

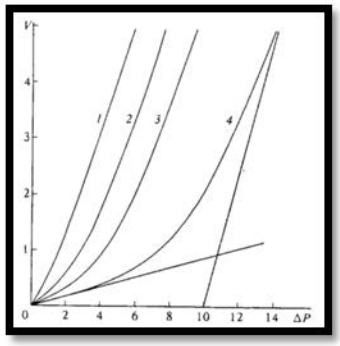

Рис. 2. Зависимость безразмерной скорости течения от приложенного перепада давления: 1 – b = 1,2; 2 – b = 3; 3 – b = 5; 4 – b = 10

Примечательно, что модель объясняет и ещё один эффект воздействия пены на фильтрационный поток газа: с течением времени имеет место понижение скорости фильтрационного течения газа. Этот эффект наблюдался в экспериментах и получил название «блокирующий режим течения». Такой режим фильтрации характеризуется значительным понижением расхода газа с течением времени при постоянной водонасыщенности.

Другой эффект воздействия пены, показанный в рис. 2 по результатам работы Корнева К.Г., проявляется в нелинейной зависимости расхода газа от приложенного перепада давления в стационарных условиях.

Литература

1. Канн К.Б. Капиллярная гидродинамика пен. – Новосибирск: Наука. Сиб отд-ние, 1989. – 167 с.
2. Тихомиров В.К. Пены. Теория м практика их получения и разрушения. 2-е изд., перераб. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
3. Корнев К.Г. Пены в пористых средах – М.: Изд. Физико-математической литературы, 2001. – 192 с.

ПРИМЕР КОНСТРУКЦИИ УНИВЕРСАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Д. А. Нечаев
Научный руководитель, доцент А. В. Шадрина
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

С увеличением объемов и расширением масштабов добычи, транспортировки, переработки и использования нефти и нефтепродуктов возрос и спектр проблем, связанных с загрязнением окружающей среды. По информации организации Greenpeace, потери нефтепродуктов при добыче и транспортировке в Российской Федерации составляют около 1%, а, например, по данным НП «Центр экологии ТЭК» – 3,5-4,5% [5]. Соответственно при текущем уровне добычи в 510 млн. тонн в год потери составляют от 18 до 23 млн т ежегодно. В связи с этим стоит острый вопрос по созданию многофункциональных современных устройств, обеспечивающих быструю и качественную ликвидацию аварийного разлива нефтепродукта (ЛАРН). Нами была предложена функциональная модель (ФМ), позволяющая создавать конструкции установок, имеющих высокий уровень агрегативности и выполняющих основные функции при выполнении процесса ЛАРН (рис. 1).

В данной работе приведен один из примеров создания универсальной установки, устройство которой полностью основано на ФМ [3]. Используя модель, нами были выделены основные функции, которые необходимо учитывать при построении конструкции оборудования для ликвидации разлива нефти:

1. Передислокация

При выполнении операций ЛАРН используют различные виды по перемещению используемых при ликвидации машин. Для перемещения машин, обеспечивающих сбор нефтепродукта с грунтовой поверхности, в основном применяют бульдозеры, экскаваторы, различные грузовые машины либо применяют ручной способ передвижения. Для машин, производящих сбор нефтепродукта с водной поверхности – различные плавающие устройства (катамараны, понтоны), специализированные суда (танкеры, ледоколы), не исключен и ручной способ передвижения устройства [7].

2. Сбор и извлечение загрязняющего нефтепродукта.

В настоящий момент при выполнении операции по сбору и извлечению загрязняющего нефтепродукта используется в основном механический способ. На грунтовой поверхности – это ручные щёточные олеофильные нефтесборщики, на водной поверхности - скиммеры с универсальной заборной установкой барабанного типа и модулем для сбора и откачки нефти [4]. Для эффективного использования данного оборудования применяют вакуумные установки, перекачивающие магистрали и емкости для хранения ликвидированного нефтепродукта [6].

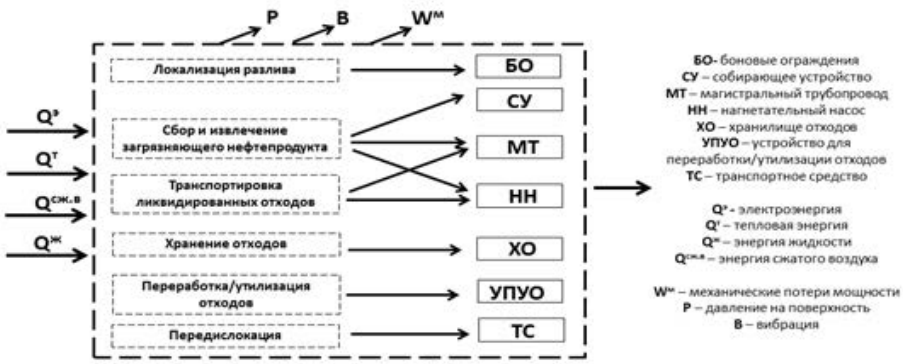

Рис. 1. Функциональная модель универсальной установки, предназначенной для ликвидации разливов нефтепродуктов