

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ  
ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ С  
ПОНТОНАМИ С УЧЕТОМ НАЛИПАЕМОСТИ ХРАНИМОГО ПРОДУКТА

Рябинин В.П., Лукьянова И.Э.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

**Описание проблемы и постановка задачи**

При транспорте и хранении нефти и нефтепродуктов имеют место значительные потери от испарения из резервуаров. Безвозвратные потери приводят к снижению качества нефтепродуктов и пагубно воздействуют на окружающую среду и здоровье людей. Вследствие потерь от испарения даже одного процента легких углеводородов, входящих в состав бензина, его октановое число снижается.

Потери нефти и нефтепродуктов могут быть сокращены в результате уменьшения открытой поверхности жидкости, а также за счет улавливания паров с последующей их утилизацией. Реализация первого направления находит свое отражение в различных типах плавающих покрытий (ПП). В мире принято разделять плавающие покрытия вертикальных цилиндрических стальных резервуаров на две основные группы – внутренние и наружные. Наружные ПП, или плавающие крыши, применяют в резервуарах, не имеющих стационарной кровли.

Внутренние ПП (понтонны) применяют в резервуарах со стационарной кровлей. Отсутствие нагрузок от ветра и атмосферных осадков упрощает и облегчает конструкцию, снижает эксплуатационные затраты, позволяет обеспечить чистоту хранимых в таких резервуарах продуктов [1].

Внутренние ПП, в зависимости от наличия контакта их нижней поверхности с большей частью зеркала хранимого в резервуаре продукта, разделяют на понтонны и экраны. Понтонны, непосредственно контактируя с продуктом, практически исключают его испарение и образование паров продукта под их поверхностью. Под настилом экранов, поддерживаемых над поверхностью

жидкости поплавками, присутствует значительное количество паров хранимой жидкости [2].

Эффективность понтонов во многом зависит от конструкции уплотняющих затворов. Работоспособность же понтонов, тесно связанная с их эффективностью, в значительной мере обусловлена конструкцией и материалами плавающего покрытия.

Преимуществами резервуаров с понтонами являются: защита продукта и самого плавающего покрытия от атмосферных осадков как в зимнее, так и в летнее время; значительное уменьшение потерь от испарения; снижение ремонтных расходов, поскольку отпадает необходимость в дренаже; легкость применения на действующих резервуарах. Но в процессе эксплуатации установлено, что возможно заклинивание металлических понтонов, перекосы, что в свою очередь приводит к крупным авариям (падению понтонов на откачиваемый продукт с возникновением теплового эффекта, приводящего к пожарам.[3]

Перекосы, заклинивание и потопление понтонов могут возникнуть из-за отклонений от вертикали направляющих в период эксплуатации за счет неравномерной осадки оснований резервуаров и отклонений верхнего слоя (депланация) стенки резервуара от первоначальной формы, а также путем взлива нефти на понтон за счет ее вспенивания.

При перекачке на форсированных режимах нефть значительно нагревается, парциальное давление растворенных в ней газов повышается. При поступлении газонасыщенной нефти в резервуаре происходит разгазирование, нефть аэрируется и плотность ее, особенно в верхних слоях, значительно снижается.

Это приводит к большему погружению понтона, к выносу нефти на понтон в виде пены или аэрированной жидкости, скорость разделения фаз в которой ниже скорости подачи нефти в резервуар.

Накопленная на понтоне нефть может сместить его центр тяжести. Создаваемый при этом перекосяк в отдельных случаях может привести к зависанию понтона при опорожнении резервуара и последующему его падению или заклиниванию и заполнению его нефтью при подъеме уровня нефти в резервуаре.

Анализ состояния понтонов после их потопления показал, что имеют случаи «спокойного» погружения понтонов в нефти и случаи, когда понтон и направляющие стойки были значительно деформированы.

Таким образом, актуальными являются исследования, направленные на повышение эксплуатационной надежности понтонов. Анализ существующих типов понтонов для резервуаров со стационарной крышей выявил необходимость исследований, направленных на улучшение таких характеристик внутренних плавающих покрытий как плавучесть, остойчивость, непотопляемость.

### **Классификация понтонов**

Классификация понтонов с основными конструктивными особенностями с учетом характеристик плавучести, остойчивости, непотопляемости, для резервуаров типа РВС со стационарной крышей схематично представлена на рис.1.

Предложенная классификация плавающих покрытий разделила все виды понтонов на две большие группы в зависимости от материала, используемого в качестве основного, что определяет конструктивные особенности понтонов.

Металлические понтоны, как более ранние по времени создания, отнесены к первой группе, которая в свою очередь подразделяется на три подгруппы. К первой и второй относятся стальные понтоны. В настоящее время используются два типа стальных плавающих покрытий:

- 1) с пустотелыми коробами, обеспечивающими плавучесть понтона и в случае нарушения герметичности части коробов,
- 2) с коробами, заполненными вспененным полимером, что позволяет экономить металл без понижения коэффициента запаса плавучести,
- 3) третья подгруппа включает алюминиевые понтоны, конструкции которых отличаются лишь формой и размером поплавков.

Ко второй группе отнесены синтетические плавающие покрытия. Группа включает три подгруппы. Известно несколько видов конструкций пластмассовых внутренних плавающих покрытий: с поплавками из пластмассы или пенопласта, с металлическими поплавками, на газовой подушке. Ко второй группе отнесены резиноканевые плавающие покрытия.

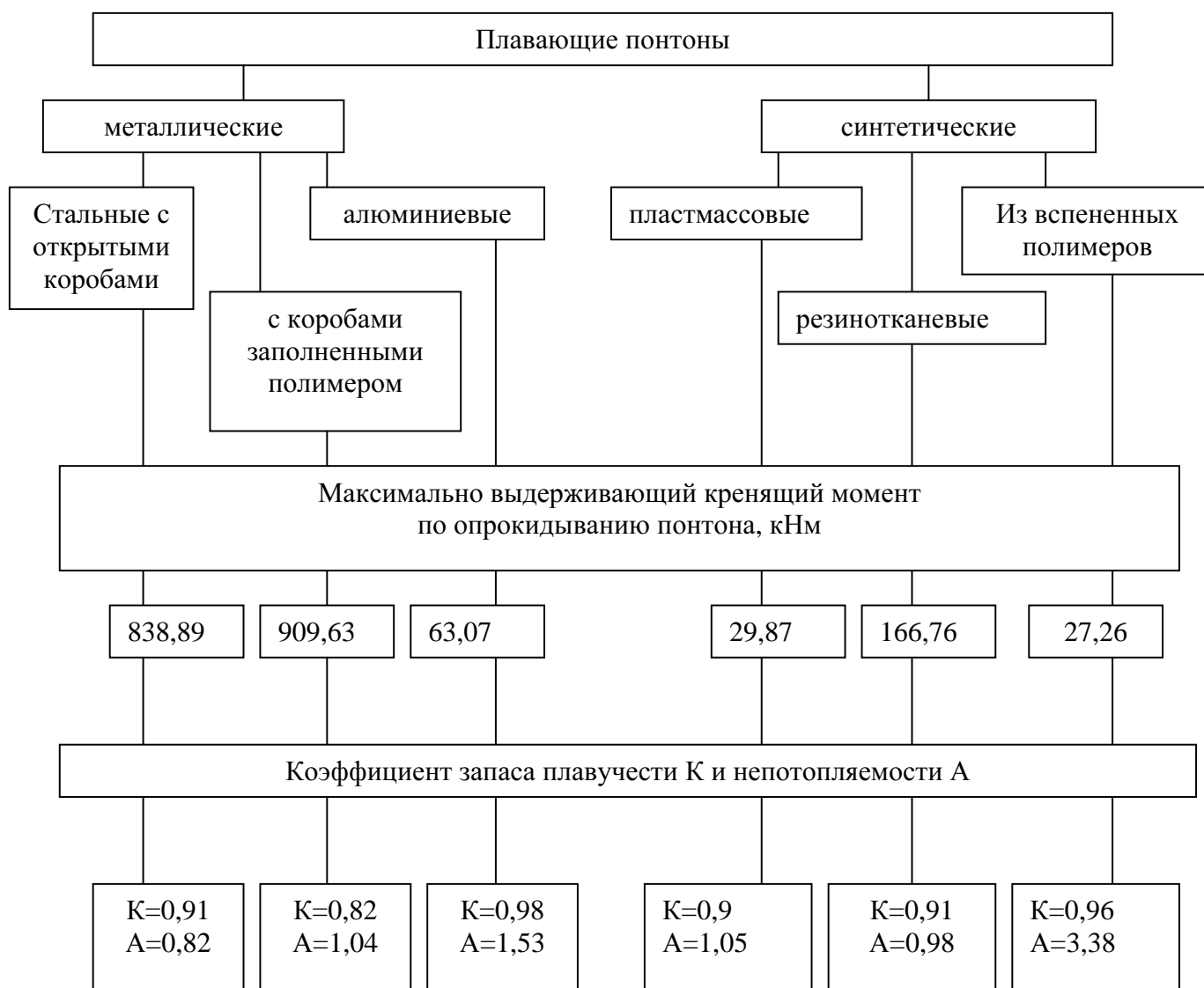


Рисунок 1. Классификация понтонов для резервуаров со стационарной крышей

Третья подгруппа включает понтоны из вспененных полимеров, недостатком материала которых является низкий предел прочности. Для ликвидации этого недостатка разработаны конструкции, предусматривающие облицовывание матрицы из вспененного полимера листовым алюминием или стеклотекстолитовыми панелями, армирование стеклосеткой.

Коэффициенты запаса плавучести были определены по формуле (3), а коэффициенты непотопляемости – по формуле (4).

Глубину погружения понтона можно определить из соотношения [4]

$$T_0 = \frac{P}{\rho \times \pi \times R^2}, \quad (1)$$

где  $P$  – масса понтона, кг;

$\rho$  – плотность жидкости кг/м<sup>3</sup>;

$R$  – радиус понтона, м.

В теории корабля запас плавучести выражают в процентах полного водоизмещения. В [2] запас плавучести плавающей крыши 3 рассматривают как разность между высотой наружной стенки  $H$  и глубиной погружения  $T_0$ .

$$З = H - T_0 \quad (2)$$

Коэффициент запаса плавучести  $K$  определяют по формуле

$$K = \frac{З}{H} \quad (3)$$

Под непотопляемостью плавающей крыши резервуара понимают способность крыши сохранять плавучесть и остойчивость при затоплении заданного числа отсеков и центральной части [2].

Последнее определение для понтонов не всегда применимо, так как не у всех понтонов имеются отсеки. Поэтому был введен коэффициент  $A$ , характеризующий непотопляемость, вычисляемый как отношение теоретического объема жидкости  $V_{теор.}$ , принятого понтоном при нулевом запасе плавучести, к объему жидкости  $V_{реал.}$ , которую понтон может реально принять на поверхность, в отсеки или поплавки:

$$A = \frac{V_{теор.}}{V_{реал.}} \quad (4)$$

Очевидно, что при  $A > 1$  понтон никогда не погрузится в жидкость, хранящуюся в резервуаре, полностью.

Остойчивость – это способность плавающего тела, выведенного из положения равновесия воздействием внешних сил, возвращаться в прежнее положение по прекращении этого воздействия [5]. Теория остойчивости изучает поведение тела в результате приложения пары сил (кренящего момента), плоскость действия которой вертикальна.

Статическую остойчивость оценивают путем сопоставления кренящего момента и восстанавливающего момента, возникающего при равнообъемном отклонении тела от исходного положения равновесия.

Динамической остойчивостью называют способность плавающего тела, опрокидываясь, воспринимать внезапно приложенные внешние динамические кренящие моменты [5].

Динамическую остойчивость оценивают путем сопоставления работы кренящего момента с работой восстанавливающего момента при наклонении тела от исходного положения равновесия до рассматриваемого положения.

Данная классификация позволила сгруппировать типы понтонов в удобном виде и дополнить существующие ранее классификации с учетом основных направлений модернизации конструкций, развивающихся по пути увеличения надежности и эффективности, сокращения потерь нефти и нефтепродуктов от испарения, отразив для каждой характеристики остойчивости, плавучести и непотопляемости.

Из классификации видно, что понтоны из вспененных полимеров обладают самым высоким коэффициентом непотопляемости, а алюминиевый понтон - самым высоким коэффициентом запаса плавучести. Было решено проверить, как влияет на плавучесть, остойчивость, непотопляемость металлических понтонов и понтонов из пенополиуретана налипание нефти и нефтепродуктов.

### **Исследования по налипанию нефти на металлическую поверхность**

Одним из составляющих потерь нефти при техническом обслуживании и ремонте резервуаров являются потери от налипания на внутреннюю поверхность оборудования, обусловленные физико-химическими и реологическими свойствами нефтей.

Известно, что липкость, клейкость - это способность высоковязкой жидкости или упруго-пластично-вязкого тела удерживаться на твердой поверхности в виде достаточно толстого слоя. Как видно из определения, величина потерь нефти от налипания зависит от ее вязкости и площади поверхности, на которой удерживается налипшая нефть. Следовательно, удельная

величина потерь нефти от налипания (коэффициент налипания) – это масса налипшей нефти, приходящаяся на единицу тела. Для определения наличия корреляционной связи между коэффициентом налипания и вязкостью нефти были выполнены предварительные исследования (8 экспериментов). В качестве основного метода при исследовании был принят метод взвешивания металлической пластины (20 x 50 x 0.5 мм) до и после погружения в нефть с различной вязкостью. Коэффициент корреляции между коэффициентом налипания и вязкостью по полученным экспериментальным данным составил 0,842. Полученное значение коэффициента корреляции позволяет утверждать о наличии тесной связи между кинематической вязкостью и коэффициентом налипания нефти.

Исследовалось также влияние времени экспонирования металлической пластины в нефти на величину коэффициента налипания. Исследования показали, что увеличение времени экспонирования металлических пластин в нефтях не дает практически заметного возрастания коэффициента налипания. Проводились эксперименты по определению влияния на массу налипшей нефти неоднократных погружений металлических пластин в нефть. В результате установлено отсутствие такого влияния [6].

Таким образом, в результате предварительных экспериментальных исследований установлено, что из всех фактов, которые могли бы оказать то или иное влияние на величину коэффициента налипания, корреляционная связь наблюдается только с вязкостью нефти.

Для получения зависимости коэффициента налипания от кинематической вязкости нефтей были проведены эксперименты. Всего проведено 62 эксперимента. Эксперименты выполняли в следующем порядке.

Перед проведением экспериментов были собраны статистические данные о величинах и диапазоне изменений кинематической вязкости товарных нефтей, перекачиваемых по магистральным нефтепроводам. В результате обработки статистических данных было получено 6 групп нефтей, отличающихся величиной вязкости:

1 группа – 0,5 – 10 мм<sup>2</sup>/с

2 группа – свыше 10 до 20 мм<sup>2</sup>/с

3 группа – свыше 20 до 30 мм<sup>2</sup>/с

4 группа – свыше 30 до 40 мм<sup>2</sup>/с

5 группа – свыше 40 до 50 мм<sup>2</sup>/с

6 группа – свыше 50 до 80 мм<sup>2</sup>/с.

Для проведения экспериментов с выше перечисленными вязкостями нефтей были созданы модели этих шести групп нефтей. Модели нефтей готовили на основе южноарланской нефти с вязкостью 39,31 мм<sup>2</sup>/с при температуре 20<sup>0</sup>С, добавлении менее вязких нефтей и керосина.

Приготовление смесей осуществлялось следующим образом. В разогретую навеску нефтей 200г (температура 30<sup>0</sup>С) добавлялись либо керосин, либо разогретая жетыбайская нефть, и перемешивались. Охлаждение исследуемой смеси осуществлялось при комнатной температуре. Затем определялась кинематическая вязкость модельной смеси при 20<sup>0</sup>С. После получения модельных нефтей с заданной вязкостью приступали к экспериментам.

Ранее изготовленные металлические пластины размером 20 x 50 x 0.5 мм в количестве 9 шт. маркировали и взвешивали на аналитических весах с точностью 0,0001 г. Затем пластины погружали в нефть. По истечении времени выдержки (1 час) пластины извлекали и взвешивали повторно. Разность двух взвешиваний соответствовала массе налипшей нефти.

Необходимое количество параллельных измерений ( $\bar{N}$ ) для каждой группы нефтей определяли по формуле

$$\bar{N} = \frac{\bar{S}^2 \cdot t_{\gamma, m-1} \cdot (1 + 1/2m \pm 2/\sqrt{2m})}{J_{\gamma}}, \quad (5)$$

где  $\bar{S}^2$  - среднее квадратичное отклонение;

$t_{\gamma, m-1}$  – значение коэффициента Стьюдента для вероятности  $\gamma$  при числе измерений  $m$ ;

$J_{\gamma}$  – доверительный интервал, на величину которого с вероятностью  $\gamma$  истинное значение может отличаться от среднеарифметического.

Расчеты показали, что для одной и той же группы нефтей необходимо выполнить не менее двух параллельных измерений. На каждой группе нефтей проведено по 3 серии экспериментов.



Как видно из полученных данных, удельная масса налипшей нефти на пластину увеличивается с возрастанием кинематической вязкости.

Используя для обработки табличных данных метод наименьших квадратов, получили зависимость величины коэффициента налипания нефти  $g_n$  от ее кинематической вязкости  $\gamma$ :

$$g_n = 0.0016 + 0.00007\gamma. \quad (6)$$

Для проверки сходимости полученной зависимости на модельных нефтях с нефтями перекачиваемыми по магистральным нефтепроводам, были выполнены эксперименты с нефтями, перекачиваемыми по нефтепроводам УБКУА, НКК, Высоко – Мозырь I, II, Канибадам – Артык, Ассаке – Ферганский НПЗ, отличающиеся кинематической вязкостью. Результаты, полученные при исследованиях, свидетельствуют о том, что удельные массы налипших на пластины нефтей хорошо согласуются с зависимостью коэффициента налипания от кинематической вязкости нефтей.

#### **Исследования по налипанию нефтепродуктов на металлическую и пенополиуретановую поверхность**

Для получения зависимости величины кинематической вязкости нефтепродуктов на металлическую поверхность от налипания (коэффициента налипания) было выполнено 48 экспериментов.

В процессе исследований выполнялись необходимые измерения, предусмотренные методикой.

В качестве основного метода определения потерь нефтепродукта от налипания был принят метод взвешивания металлической пластины с различной степенью шероховатости до и после погружения в нефтепродукт.

Для проверки связи коэффициента налипания (массы налипшего нефтепродукта на единицу поверхности) с вязкостью нефтепродукта были выполнены предварительные исследования.

Из предположения наличия связи между коэффициентом налипания и вязкостью был определен коэффициент корреляции по полученным экспериментальным данным:

$$r = \frac{1}{S_x \times S_y} \times \frac{1}{n-1} \times [\sum x_1 \times y_1 - \bar{x} \times \bar{y} \times n], \quad (7)$$

где  $S_x^2, S_y^2$  - эмпирические дисперсии;

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} [\sum_1^n x_1^2 - (\bar{x})^2 \times n];$$

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1} [\sum_1^n y_1^2 - (\bar{y})^2 \times n]; \quad (8)$$

$x_1$  - кинематическая вязкость нефтепродуктов;

$y_1$  - коэффициент налипания (удельная масса налипшего нефтепродукта);

$n$  - количество результатов измерений по определению коэффициента налипания нефтепродуктов.

$$S_x^2 = \frac{1}{4} [55.7567 - 39.5930] = 4.0409; \quad S_x = 2.01;$$

$$S_y^2 = \frac{1}{4} [0.0004546 - 0.0003362] = 0.0000296; \quad S_y = 0.054;$$

$$r = \frac{1}{2.01 \times 0.054} \times \frac{1}{4} \times [0.156124 - 0.115374] = 0.938.$$

Приведенное значение коэффициента корреляции  $r$  позволяет утверждать о наличии тесной связи между кинематической вязкостью и величиной коэффициента налипания нефтепродуктов.

Для выяснения влияния времени выдержки на величину коэффициента налипания нефтепродуктов на металлические пластины выполнены предварительные эксперименты. Результаты показали, что сличение времени выдержки металлических пластин в нефтепродукте не дает заметного возрастания коэффициента налипания. Кроме того, были проведены эксперименты по определению влияния на массу налипшего нефтепродукта неоднократных погружений металлических пластин в нефтепродукт. Исследования велись при одной и той же температуре нефтепродукта. В результате установили отсутствие этого влияния.

Таким образом, в результате предварительных исследований определили, что из всех факторов, которые могли бы оказать то или иное влияние на величину коэффициента налипания, наибольшее влияние оказывает вязкость нефтепродуктов.

На основании результатов предварительных исследований, приступили к экспериментальному определению зависимости коэффициента налипания от кинематической вязкости нефтепродуктов.

Эксперименты выполняли в следующем порядке. Перед проведением экспериментов были собраны статистические данные о возможных величинах кинематической вязкости нефтепродуктов, перекачиваемых по магистральным нефтепродуктопроводам.

Ранее изготовленные металлические пластины с различной степенью шероховатости (средняя степень шероховатости 0,0033 см) с размерами 20 x 50 x 0,5 мм в количестве 9 шт. маркировали, взвешивали на аналитических весах с точностью 0,0001 г, затем пластины погружали в нефтепродукты. По истечении времени выдержки (1 час) пластины вынимали и взвешивали повторно.

Разность двух взвешиваний соответствовала массе налипшего нефтепродукта.

Из полученных данных видно, что удельная масса налипшего нефтепродукта на пластину увеличивается с возрастанием кинематической вязкости.

Используя для обработки табличных данных метод наименьших квадратов, получили зависимость величины коэффициента налипания нефтепродукта от кинематической вязкости нефтепродуктов:

$$g = 0.0010 + 0.0025 \cdot \gamma. \quad (9)$$

Доверительный интервал для усредненного значения коэффициентов налипания нефтепродуктов находился по формуле:

$$\Delta Y_{\alpha} = t(P, S) \sqrt{S_0^2 \left[ \frac{1}{m} + \frac{m(x_k - \bar{x})^2}{m \sum x_1^2 - (\sum x_1)^2} \right]}, \quad (10)$$

где  $t(P, S)$  - распределение в зависимости от принятой вероятности и числа степеней свободы;

$S_0^2$  - дисперсия, характеризующая разброс измеренных значений ( $y_1$ ) относительно вычисленных ( $Y_1$ ),

$m$  - количество усредненных вязкостей в каждом принятом интервале вязкостей;

$\bar{X}$  - среднее значение вязкости во всех исследованиях;

$x_k$  - усредненная вязкость в интервале, для которого вычисляется доверительный интервал среднего значения коэффициента налипания нефтепродуктов.

Относительная погрешность определения коэффициентов налипания нефтепродуктов находится в пределах 5,6 % при кинематической вязкости  $1 \text{ м}^2/\text{с} \cdot 10^{-6}$ , 1,6 % при кинематической вязкости  $3 \text{ м}^2/\text{с} \cdot 10^{-6}$  и 1,2 % при кинематической вязкости  $4 \text{ м}^2/\text{с} \cdot 10^{-6}$ . Этим погрешностям соответствует изменение величины коэффициента налипания нефтепродуктов в интервале 0,0011 % масс + 0,0014 % масс.

Следовательно, полученная зависимость достаточно точно описывает зависимость коэффициента налипания нефтепродуктов от кинематической вязкости.

Аналогично были проведены лабораторные исследования по налипанию нефтепродуктов на пенополиуретановую поверхность. Для получения зависимости величины потерь от налипания (коэффициента налипания) было выполнено 36 экспериментов.

В результате предварительных исследований определили, что из всех факторов, которые могли бы оказать то или иное влияние на величину коэффициента налипания нефтепродуктов на пенополиуретановую поверхность, наибольшее влияние оказывает вязкость нефтепродуктов.

Ранее изготовленные образцы, покрытые латексом с различной степенью шероховатости, с размерами 150 x 50 x 5 мм в количестве 5 шт. маркировали, взвешивали на аналитических весах с точностью 0,0001 г, затем пластины погружали в нефтепродукты. По истечении времени выдержки (1 час) пластины вынимали и взвешивали повторно: разность двух взвешиваний соответствовала массе налипшего нефтепродукта.

Из полученных по результатам экспериментов данных по налипанию на пенополиуретановые образцы, удельная масса налипшего нефтепродукта на образец увеличивается с возрастанием кинематической вязкости.

Используя для обработки табличных данных метод наименьших квадратов, получили зависимость величины коэффициента налипания нефтепродукта от кинематической вязкости нефтепродуктов:

$$g = 0.0252 + 0.00169 \cdot \gamma. \quad (11)$$

Для полученной зависимости по результатам статистической обработки экспериментальных данных рассчитаны (с вероятностью  $P = 0,83$ ) доверительные интервалы.

Полученная зависимость достаточно точно описывает зависимость коэффициента налипания нефтепродуктов от кинематической вязкости.

Для расчета потерь от налипания нефтепродукта на внутреннюю поверхность плавающего покрытия необходимо знать площадь внутренней поверхности  $S$ . Потери нефтепродукта от налипания могут быть рассчитаны по формуле:

$$p = g \times S. \quad (12)$$

### **Выводы**

Предложена классификация, которая позволила сгруппировать типы понтонов в удобном виде и дополнить существующие ранее классификации с учетом основных направлений модернизации конструкций, развивающихся по пути увеличения надежности и эффективности, сокращения потерь нефти и нефтепродуктов от испарения, отразив для каждой характеристики остойчивости, плавучести и непотопляемости.

Из классификации видно, что понтоны из вспененных полимеров обладают самым высоким коэффициентом непотопляемости, а алюминиевый понтон - самым высоким коэффициентом запаса плавучести. Таким образом, актуальными являются исследования, направленные на повышение эксплуатационной надежности алюминиевых и пенополиуретановых понтонов.

В результате исследований установлено, что из всех факторов, которые могли бы сказать то или иное влияние на величину коэффициента налипания, корреляционная связь наблюдается только с вязкостью нефти и нефтепродуктов. Для получения зависимости коэффициента налипания от кинематической вязкости нефтей и нефтепродуктов были проведены эксперименты. Получены зависимости коэффициента налипания на металлические и пенополиуретановые покрытия от кинематической вязкости нефтей и нефтепродуктов. Для расчета потерь и увеличения массы плавающих покрытий за счет налипшего нефтепродукта необходимо знать площадь внутренней поверхности. Эта площадь может быть определена путем натуральных измерений или определена по чертежам оборудования.

### Литература

1. Дегтярев В.Н. Пути повышения надежности работы резервуаров с понтонами. / В.Н. Дегтярев, С.М. Богачев // Нефтепромысловое дело, № 8, 1984. – С. 114-118
2. Каравайченко М. Г., Л.А. Бабин, Р.М. Усманов. Резервуары с плавающими крышами. – М.: Недра, 1992. – 240 с.
3. Абузова Ф.Ф., Теляшева Г.Д., Мишин Ю.Ф. Пути сокращения потерь углеводородов от испарения при хранении и транспортировании нефти и нефтепродуктов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья / ЦНИИТЭнефтехим. - 1989. - Вып. 5. - 56 с
4. Семенов–Тян–Шанский В.В. Статика и динамика корабля. Плаучесть, остойчивость и спуск на воду. – Л.: Судостроение, 1973. – 608с.
5. Жинкин В.Б. Теория и устройство корабля / В.Б. Жинкин – СПб.: Судостроение, 1995. – 336с.
6. Батгалов А.З., Бронштейн И.С. “Исследование потери нефти от адгезии при техническом обслуживании и ремонте магистральных нефтепроводов”// ИПТЭР. Сборник научных трудов. Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 1994 - с.31 – 36.