

*А.А. Кирсанов, В.В. Сеницын, В.В. Татарин*  
(Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана; e-mail: kirsan@live.ru)

## **О ДИНАМИКЕ ПЛОЩАДИ ИСПАРЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ЗАПРАВКЕ КРУПНОТОННАЖНЫХ ЁМКОСТЕЙ**

*Анализируется процесс испарения нефтепродуктов при заправке крупнотоннажных ёмкостей для хранения и транспортировки жидкостей. Получена аналитическая зависимость динамики площади испарения жидкости, обусловленная геометрией ёмкости и скоростью подачи жидкости. Предложена аппроксимационная формула для горизонтального цилиндрического резервуара.*

*Ключевые слова: математическая модель, площадь зеркала испарения, нефтепродукты, горизонтальная цилиндрическая ёмкость.*

*A.A. Kirsanov, V.V. Sinicyn, V.V. Tatarinov*  
**ABOUT DYNAMICS OF THE AREA  
OF EVAPORATION OF PETROLEUM PRODUCTS  
DURING FUELING LARGE-CAPACITY CONTAINERS**

*Analysis of process of petroleum products evaporation during fueling large-capacity containers for storage and transportation liquids was carried out. An analytical dependence of dynamics of liquid area evaporation, due to the geometry of the container and the liquid feed rate was got. An approximate formula for a horizontal cylindrical container was proposed.*

*Key words: mathematical model, area of mirror evaporation, petroleum products, horizontal cylindrical container.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 2 июля 2016 г.

В процессе сливноналивных операций с нефтепродуктами и при их хранении в резервуарах больших ёмкостей имеют место технологические потери, обусловленные, в первую очередь, испарением. Определение величины этих потерь представляет значительный интерес на предприятиях нефтяных компаний Российской Федерации.

В общем виде постановка задачи испарения [1] нефтепродуктов в ёмкости описывается уравнениями Навье-Стокса в стационарной постановке:

$$\begin{cases} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} v_x); \\ v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} v_y); \\ v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} v_z); \end{cases}$$

и уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} = 0,$$

где  $v_x, v_y, v_z$  – компоненты скорости испарения, м/с;

$\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Очевидно, что для данной системы уравнений аналитическое решение получить невозможно.

В "Методических указаниях по определению технологических потерь нефти на предприятиях нефтяных компаний Российской Федерации" (РД 153-39-019-97) приведены источники технологических потерь нефти, а также классификация потерь [2].

Анализ рассмотренных методов оценки потерь нефтепродуктов показывает, что ни в одном из них не рассматривается в качестве исходного параметра площадь зеркала нефтепродуктов, находящихся в резервуаре. Отсутствие столь важной величины, как площадь испарения, в качестве одного из основных параметров при оценке потерь нефтепродуктов, обусловлено, вероятнее всего, тем, что при наливе, хранении и сливе нефтепродуктов из резервуара площадь испарения у стационарных резервуаров остаётся неизменной.

Однако, как нам представляется, косвенные методы можно уточнить, если использовать более адекватные физические модели испарения нефтепродуктов при наливе резервуаров большой ёмкости.

Анализ содержания нормативных документов [2-5] позволил установить, что в основу определения потерь положены инструментальные методы, суть которых состоит в непосредственном измерении или расчёте объёма (массы) паров углеводородов, вытесняемых из ёмкости в процессе сливноналивных операций или при хранении нефтепродуктов.

Потери углеводородов рассчитываются по формуле

$$G = V \cdot C \cdot r,$$

где  $G$  – потери углеводородов, кг;

$V$  – объём паровоздушной смеси, вышедшей из резервуара за измеряемый промежуток времени, приведённый к давлению 0,101 МПа и температуре 273 °К, м<sup>3</sup>;

$C$  – концентрация углеводородов в выходящей из резервуара паровоздушной смеси, доли единицы;

$r$  – средняя плотность вытесняемых из резервуаров углеводородных паров (кг/м<sup>3</sup>), приведённых к давлению 0,101 МПа и температуре 273 °К.

При отсутствии данных хроматографических анализов, плотность паров можно рассчитать по формуле

$$r = \frac{M_{II}}{22,41}, \quad (1)$$

где  $M_{II} = 0,0043 \cdot (212 + t_{НК})^{1,7}$  – средняя молярная масса углеводородных паров нефти в паровоздушной смеси, кг/моль; ( $4,3 \cdot 10^{-3}$ );

$t_{НК}$  – температура начала разгонки нефти, °С.

Рассмотрим математическую модель потери нефтепродуктов из резервуаров больших объёмов.

При хранении и во время сливноналивных операций потери обусловлены испарением, которое, при прочих равных условиях, зависит от площади испарения (площади зеркала нефтепродуктов в резервуаре), температуры и продолжительности процесса. Разрабатывая математическую модель потерь нефтепродуктов из резервуаров, не делая большой ошибки, можно считать количество испарившихся углеводородов пропорциональным площади зеркала жидкости (площади свободной поверхности жидкости), а температуру во время налива резервуара – постоянной.

Площадь испарения определяется конструкцией резервуара. Так, у резервуаров в форме параллелепипеда или вертикального цилиндра (сварные вертикальные цилиндрические резервуары) площадь свободной поверхности жидкости определяется геометрическими размерами основания и остаётся неизменной как во время сливноналивных операций, так и в процессе хранения (рис. 1а, б). Для резервуара в виде *горизонтально расположенного цилиндра (цистерны)* площадь свободной поверхности жидкости меняется во время сливноналивных операций (рис. 1в).

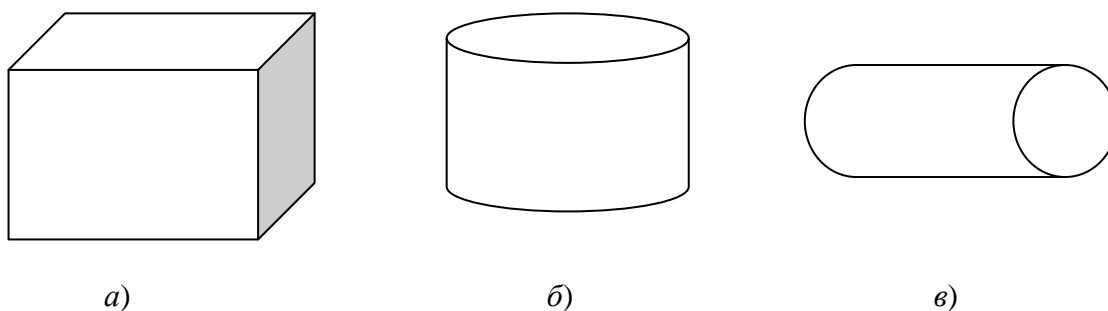


Рис. 1. Модели резервуаров

Для резервуаров с неизменяемой площадью испарения (рис 1а, б) количество испарившихся углеводородов (масса паровоздушной смеси  $M_{ПВ}$ ) может составить

$$M_{ПВ} = \alpha \cdot S \cdot t,$$

где  $\alpha$  – удельная скорость испарения жидкости с единицы площади в единицу времени;

$S$  – площадь испарения жидкости (площадь основания резервуара);

$t$  – продолжительность процесса сливноналивных операций (хранения нефтепродуктов).

Скорость подъёма уровня жидкости в резервуаре во время сливноналивных операций определяется производительностью наливной системы

$$dh = \frac{U}{S},$$

где  $U$  – производительность наливной системы;

$S$  – площадь основания резервуара.

Необходимо отметить, что в соответствии с ВППБ 01-04-98 "Правила пожарной безопасности для предприятий и организаций газовой промышленности", скорость наполнения резервуара (производительность наливной системы) не должна превышать суммарной пропускной способности установленных на резервуарах дыхательных клапанов.

Объём паровоздушной смеси в резервуаре

$$V_{ПВ} = V_p - t d h,$$

где  $V_p$  – полный объём заполняемого резервуара.

В процессе заполнения резервуара в форме горизонтально расположенного цилиндра (рис. 1в) количество испарившихся углеводородов определяется не только удельной скоростью испарения жидкости, но и изменяющейся во времени площадью испарения.

Рассмотрим эту задачу подробно.

Геометрическая модель (рис. 2) характеризуется диаметром резервуара  $D = 2r$  и длиной  $L$ . Объём жидкости представляет собой цилиндрический сегмент:

$$V = L S_{сег.}$$

Так как длина резервуара не изменяется во времени, то основным понятием, определяющим динамику, является длина хорды  $AB$  (рис. 3).

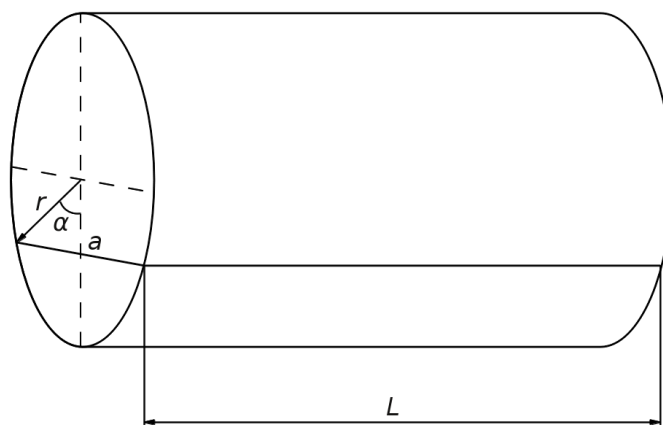


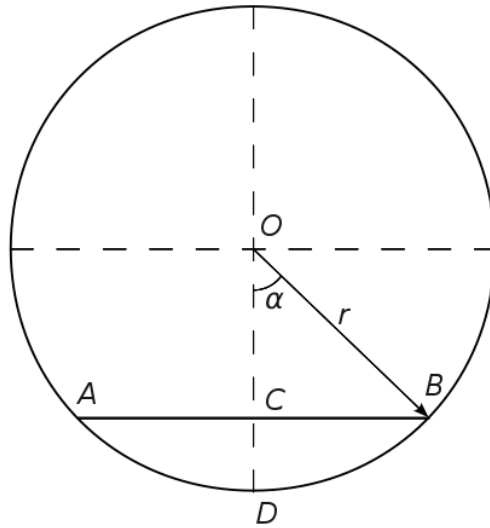
Рис. 2. Горизонтальная цилиндрическая ёмкость

Известно, что площадь сегмента  $ADB$  определяется скоростью подачи жидкости:

$$S_{ADB} = \frac{U t}{L},$$

где  $U$  – интенсивность наполняющего потока,  $м^3/ч.$ ;

$t$  – текущее время заправки.



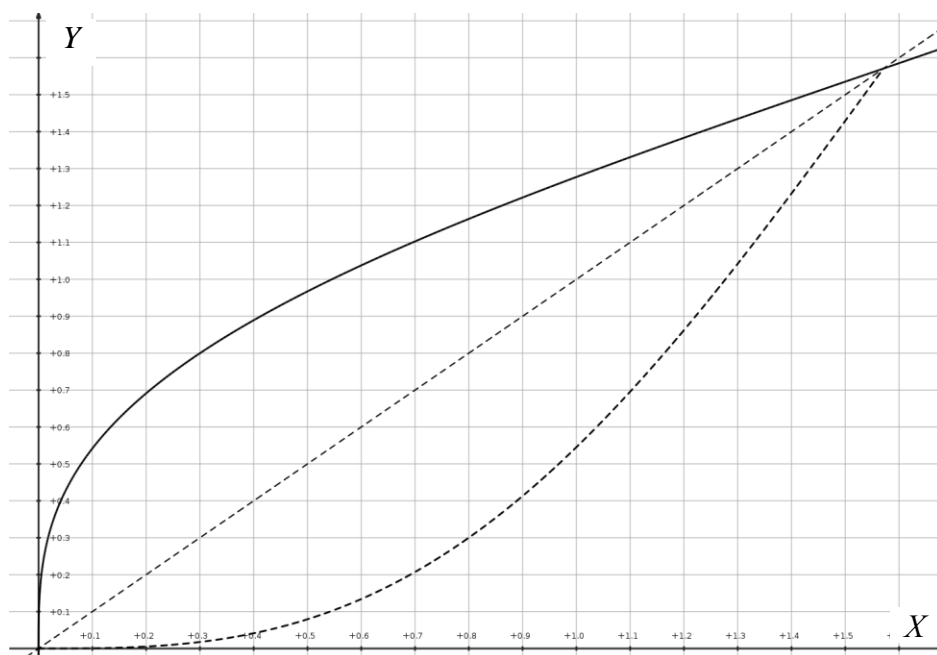
**Рис. 3.** Пояснения к расчётам площади зеркала испарения

В то же время, площадь сегмента  $ADB$  – это разность площади кругового сектора и площади равнобедренного треугольника с центральным углом. Основанием равнобедренного треугольника является хорда  $AB = a$  в стороне прямоугольника зеркала жидкости. Так как одна из сторон данного прямоугольника – величина постоянная, то необходимо определить функциональную зависимость длины хорды от радиуса цистерны и скорости потока.

В силу осевой симметрии рассмотрим половину хорды и изменение угла от 0 до  $\frac{\pi}{2}$ . Из рис. 2 следует:

$$\begin{aligned} \frac{S_{ceз}}{2} &= S_{ODB} - S_{OCB}; \\ S_{OCB} &= \frac{1}{2} r^2 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha = \frac{1}{4} r^2 \cdot \sin 2\alpha; \\ S_{ODB} &= \frac{\alpha r^2}{2}; \\ S_{ceз} &= \alpha r^2 - \frac{1}{2} r^2 \cdot \sin 2\alpha; \\ \frac{S_{ceз}}{r^2}(\alpha) &= \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

Анализ выражения (2) показал, что полученная функция является трансцендентной и для её использования требуется применение численных методов. На рис. 4 представлены графики выражения (2) (пунктир) и прямой функции (сплошной), которую необходимо найти.



**Рис. 4.** Изменение величины нормированной площади цилиндрического сегмента от центрального угла

Для расчёта угла  $\alpha$  можно воспользоваться табл. 1, полученной решением обратной задачи.

Таблица 1

$\alpha$	$S_{ce2}(\alpha)/r^2$	$\alpha$	$S_{ce2}(\alpha)/r^2$	$\alpha$	$S_{ce2}(\alpha)/r^2$
1	0,0000	31	0,0996	61	0,6406
2	0,0000	32	0,1091	62	0,6676
3	0,0001	33	0,1192	63	0,6950
4	0,0002	34	0,1298	64	0,7230
5	0,0004	35	0,1410	65	0,7514
6	0,0008	36	0,1528	66	0,7803
7	0,0012	37	0,1651	67	0,8097
8	0,0018	38	0,1781	68	0,8395
9	0,0026	39	0,1916	69	0,8697
10	0,0035	40	0,2057	70	0,9003
11	0,0047	41	0,2205	71	0,9314
12	0,0061	42	0,2358	72	0,9627
13	0,0077	43	0,2517	73	0,9945
14	0,0096	44	0,2682	74	1,0266
15	0,0118	45	0,2854	75	1,0590
16	0,0143	46	0,3032	76	1,0917
17	0,0171	47	0,3215	77	1,1247
18	0,0203	48	0,3405	78	1,1580
19	0,0238	49	0,3601	79	1,1915
20	0,0277	50	0,3803	80	1,2253
21	0,0320	51	0,4010	81	1,2592
22	0,0366	52	0,4224	82	1,2934
23	0,0418	53	0,4444	83	1,3277
24	0,0473	54	0,4669	84	1,3621
25	0,0533	55	0,4901	85	1,3967
26	0,0598	56	0,5138	86	1,4314
27	0,0667	57	0,5381	87	1,4662
28	0,0742	58	0,5629	88	1,5010
29	0,0821	59	0,5883	89	1,5359
30	0,0906	60	0,6142	90	1,5708

Для углов, которые больше  $90^\circ$ , отношение площади к квадрату радиуса больше 1,5708: для столбца  $\frac{S_{сез}}{r^2}(\alpha)$  берётся значение, равное разнице  $\pi$  и площади, а соответствующей данной строке угол, смежен углу, который надо найти.

При аппроксимации прямой функции получается следующее выражение:

$$\alpha = \left( \frac{S_{сез}}{r^2} \right)^a - e^{-b \frac{S_{сез}}{r^2}} + 1, \quad (3)$$

где  $x = \frac{S_{сез}}{r^2}$ .

Коэффициенты  $a$  и  $b$  в выражении (3) можно найти перебором, с использованием компьютера.

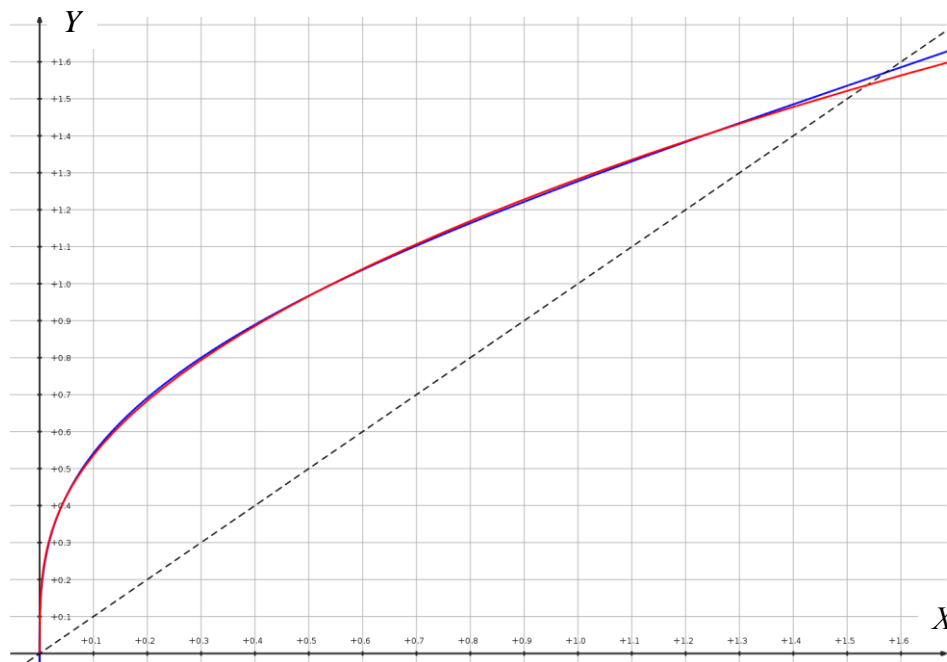
По результатам вычислений получены следующие значения:

$$a = 0,298;$$

$$b = 0,333.$$

На рис. 5 представлены графики:

- синим – функция, обратная (2);
- красным – функция (3).



**Рис. 5.** Аппроксимация обратной функции

Расчёт показал, что при данной аппроксимации погрешность при углах  $\alpha < \frac{17\pi}{18}$  составляет менее 5 %.

Зная значение угла  $\alpha$ , хорду  $a$  можно получить из выражения:

$$a = 2r \sin \alpha. \quad (4)$$

Используя (1), (3) и (4), получим зависимость площади прямоугольника зеркала жидкости от времени:

$$S(t) = \begin{cases} 2Lr \sin \left( \left( \frac{Ut}{Lr^2} \right)^{0,298} - e^{-0,333 \frac{Ut}{Lr^2}} + 1 \right), & 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}, 0 \leq t < \frac{\pi r^2 L}{2U}; \\ 2Lr \sin \left( \left( \frac{\pi r^2 - \frac{Ut}{L}}{r^2} \right)^{0,298} - e^{-0,333 \frac{\pi r^2 - \frac{Ut}{L}}{r^2}} + 1 \right), & \frac{\pi}{2} \leq \alpha < \pi, \frac{\pi r^2 L}{2U} \leq t < \frac{\pi r^2 L}{U}. \end{cases} \quad (5)$$

В качестве примера рассмотрим динамику изменений площади для резервуара с длиной  $L = 11$  м, радиусом  $r = 1,5$  м, интенсивностью потока  $U_1 = 25$  м<sup>3</sup>/ч,  $U_2 = 40$  м<sup>3</sup>/ч.

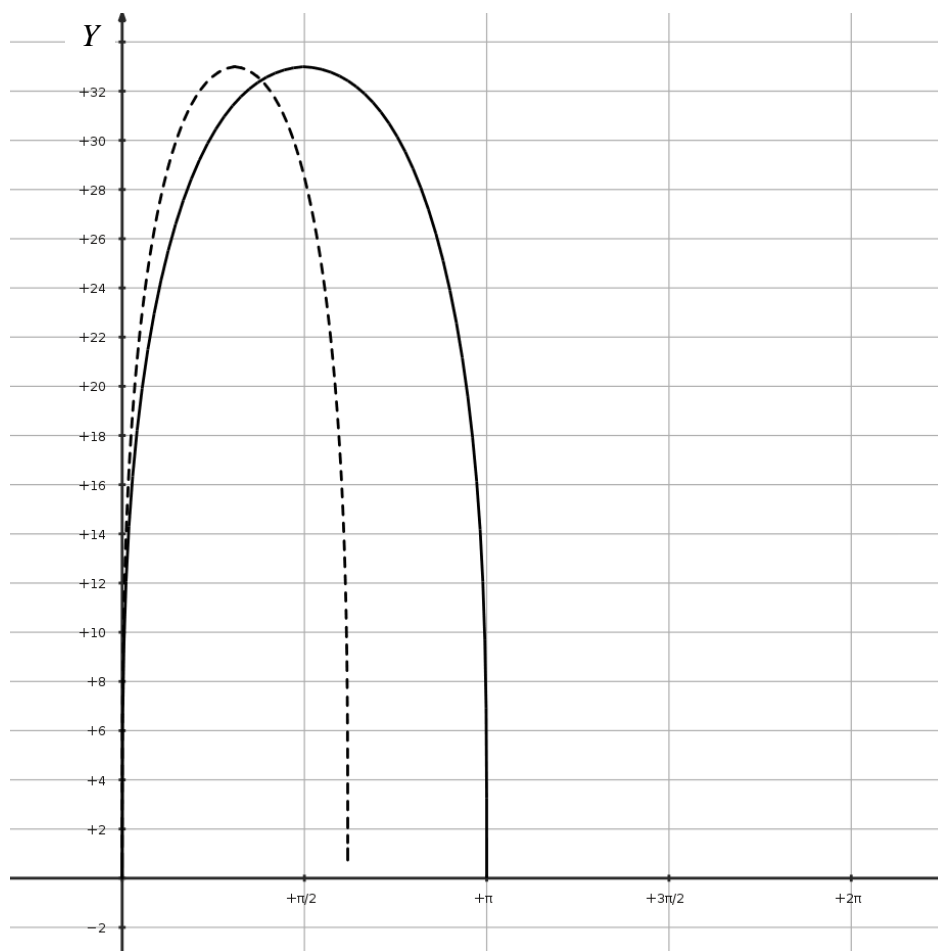
Используя формулу (5), получим:

$$S_1(t) = \begin{cases} 33 \sin \left( t^{0,298} + 1 - e^{-0,336t} \right), & 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}, 0 \leq t < 0,495\pi; \\ 33 \sin \left( (\pi - t)^{0,298} + 1 - e^{-0,333(\pi - t)} \right), & 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}, 0,495\pi \leq t < \pi; \end{cases}$$

$$S_2(t) = \begin{cases} 33 \sin \left( (1,616t)^{0,298} + 1 - e^{-0,538t} \right), & 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}, 0 \leq t < 0,31\pi, \\ 33 \sin \left( (\pi - 1,616t)^{0,298} + 1 - e^{-0,333(\pi - 1,616t)} \right), & 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}, 0,31\pi \leq t < 0,62\pi. \end{cases}$$

Ниже приведены графики динамики изменений площади прямоугольника зеркала жидкости для угла  $\alpha < 150^\circ$ ,  $S_1(t)$  – сплошная линия,  $S_2(t)$  – пунктирная.





**Рис. 6.** Динамика изменений площади испарения для различных скоростей наполняющего потока

В ходе проведённого исследования была изучена динамика испарения нефтепродуктов в процессе заправки крупнотоннажных ёмкостей, в частности, получена зависимость площади зеркала жидкости от времени заправки.

#### Литература

1. **Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А.** Тепломассообмен. М.: МЭИ, 2005. 549 с.
2. **РД 153-39-019-97.** Методические указания по определению технологических потерь нефти на предприятиях нефтяных компаний Российской Федерации. М.: Госгортехнадзор РФ, 1997.
3. **ВППБ 01-04-98.** Правила пожарной безопасности для предприятий и организаций газовой промышленности. М.: ОАО "ГАЗПРОМ", 1998.
4. **РД 03-409-01.** Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010.
5. **РД 03-418-01.** Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. Мо.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010.