# ФИЗИКА

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ	
Закиев И.Д., Радаев А.В., Мухамадиев А.А., Сабирзянов А.Н. Исследование влияния смешивающе- гося режима вытеснения нефти сверхкритическим СО <sub>2</sub> из однородного пласта на коэффициент вытеснения нефти	47
Давлетиин А.А., Радаев А.В., Мухамадиев А.А., Сабирзянов А.Н. Экспериментальный стенд для исследования процесса вытеснения нефти из модели неоднородного нефтяного пласта с использованием сверхкритического СО <sub>2</sub> и оторочек сверхкритического СО <sub>2</sub> и воды	42
Тимеркаев Б.А., Шакиров Б.Р., Калеева А.А., Фельцингер В.С. Формирование кремниевых нано- структур в электрическом разряде	37
Ахмад Р.К., Плохотников С.П., Никифорова С.В., Аль Джабри Адель Яхья Али Решение одной за- дачи усреднения коэффициентов системы эллиптических и параболических уравнений	30
Аль Джабри Адель Яхья Али, Плохотников С.П., Никифорова С.В., Ахмад Р.К. Вычисление и ана- лиз двумерных и трехмерных течений для различных вероятностных законов задания по- слойной неоднородности пласта при неизотермической фильтрации	24
Гумеров В.Г. Определение крутящего момента, действующего на внезапно приведенный в движение круговой цилиндр	18
<i>Тукмакова Н.А.</i> Изменение дисперсности двухфазной смеси в процессах дробления и коагуля- ции капель	11
Гайнутдинов И.С., Муравьев Е.А., Малафеев И.Д., Хасанов А.М., Кольцов А.Ю. Повышение ста- бильности спектральной границы пропускания УФ-фильтра при нанесении пленок оксида гафния с использованием ионного ассистирования	5

Скорнякова Е.А., Васюков В.М., Сулаберидзе В.Ш. Особенности создания пользовательского	
интерфейса автоматизированной системы производственного планирования	. 52
Гузельбаева И.А., Надеждина М.Е. Эвакуация и организация промышленного производства	
в годы Великой Отечественной войны на примере завода № 387	. 57

### ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Кесель Л.Г., Могилюк И.А., Толстая Н.В. Методика расчета предельно допустимой освещенности в рабочем объеме индикатрисометра	62
Кесель Л.Г., Могилюк И.А., Толстая Н.В. Повышение чувствительности индикатрисометра для измерения индикатрисы отдельной частицы	65
Щербакова Т.Ф., Галимзянов Э.Р., Щербакова В.А. Система многопараметрического анализа электрокардиосигнала для задачи определения состояния «бодрость – сон – напряженность» водителей транспортных средств	69
Ефремова Е.С., Солдаткин Р.В. Модели динамических погрешностей вихревой системы воз- душных сигналов дозвукового летательного аппарата	75
Арискин Е.О., Солдаткин В.М. Модели инструментальных погрешностей системы измерения параметров вектора ветра на борту вертолета с ионно-меточными и аэрометрическими изме- рительными каналами	82
Петров В.Н., Шабалина О.К., Петров С.В., Шабалин А.С. Воспроизведение многофазных потоков на эталонах массового расхода газожидкостных смесей	89
Рябов И.В., Клюжев Е.С., Стрельников И.В., Юрьев П.М. Сравнительный анализ цифровых и цифроаналоговых синтезаторов частот и сигналов	96

Петров В.Н., Гортышов Ю.Ф., Евдокимов Ю.К., Левин К.А. Физическое моделирование газожид-	
костных потоков	104
Рябов И.В., Дегтярев Н.В., Клюжев Е.С., Стрельников И.В., Юрьев П.М. Прямой цифровой синтез	
широкополосных сигналов в системах радиолокации, связи и телекоммуникациях	111
Мохаммед Х.С.А. Прибор для контроля и измерения температурного поля в неизотермических	
потоках газа и жидкости полупроводниковым одномерным квазираспределенным датчиком	117
Горбунов И.А., Карамов Ф.А., Старцев С.А. Интеграторы дискретного действия при построении	
устройств современных радиотехнических систем	124

# PHYSICS

Gainutdinov I.S., Murav'ev E.A., Malafeev I.D., Khasanov A.M., and Kol'tsov A.Yu. Improving the stability of the spectral limit of transmission of the UV filter in applying films of hafnium oxide using ion assistance.	5
<i>Tukmakova N.A.</i> Changing of the two-phase mixture dispersity in the fragmentation and coagulation processes of droplets	11
<i>Gumerov V.G.</i> Determination of a torque acting on a circular cylinder suddenly set in motion	18
ALGabri Y., Plokhotnikov S.P., Nikiforova S.V., and Ahmad R.K. Comparative analysis of two-dimensional and three-dimensional numerical solutions for two probabilistic laws of two-phase non-isothermal filtration in layered reservoir	24
Ahmad R.K., Plokhotnikov S.P., Nikiforova S.V., and ALGabri Y. Solution of a problem of averaging the coefficients of the system of elliptic and parabolic equations	30
<i>Timerkaev B.A., Shakirov B.R., Kaleeva A.A., and Fel'tsinger V.S.</i> Formation of silicon nanostructures in electrical discharge	37
Davletshin A.A., Radaev A.V., Mukhamadiev A.A., and Sabirzyanov A.N. An experimental test bed for studying the process of oil displacement from the heterogeneous model of oil reservoir by supercritical CO <sub>2</sub> and fringes of supercritical CO <sub>2</sub> and water	42
Zakiev I.D., Radaev A.V., Mukhamadiev A.A., and Sabirzyanov A.N. Research of the influence of the mixing mode of oil displacement by supercritical CO <sub>2</sub> from a homogeneous reservoir on the oil displacement coefficient	47

## MECHANICAL AND THEORETICAL ENGINEERING

Skornyakova E.A., Vasyukov V.M., and Sulaberidze V.Sh. Features of user interface creation for	
automated production planning system	52
Guzel'baeva I.A. and Nadezhdina M.E. Evacuation and organization of industrial production during	
the great patriotic war by the example of plant No. 387	57

# INSTRUMENT ENGINEERING, METROLOGY, INFORMATION-MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Kesel L.G., Mogilyuk I.A., and Tolstaya N.V. A technique of calculating the maximum allowable illumination in the working volume of an indicatrix meter	62
Kesel' L.G., Mogilyuk I.A., and Tolstaya N.V. Increasing the sensitivity of an indicatrix meter to measure the indicatrix of individual particles	65
Sherbakova T.F., Galimzyanov E.R., and Shcherbakova V.A. A system of multiparameter analysis of the electrocardiosignal for determining the driver's "wakefulness – sleep – alertness" condition	69
<i>Efremova E.S. and Soldatkin R.V.</i> Models of dynamic errors of the vortex air data system of a subsonic aircraft	75
Ariskin E.O., and Soldatkin V.M. Models of instrument errors for the system of measuring the wind vector parameters aboard a helicopter with ion-meter and aerometric sensing channels	82
Petrov V.N., Shabalina O.K., Petrov S.V., and Shabalin A.S. Reproduction of multiphase flows at the standards of the mass flow of gas-liquid mixtures	89
Ryabov I.V., Klyuzhev E.S., Strel'nikov I.V., and Yur'ev P.M. Comparative analysis of digital and digital-to-analog synthesizers	96
Petrov V.N., Gortyshov Yu.F., Evdokimov Yu.K., and Levin K.A. Physical modeling of gas-liquid flows	104

Ryabov I.V., Degtyarev N.V., Klyuzhev E.S., Strel'nikov I.V., and Yur'ev P.M. Direct digital synthesis of	
broadband signals in radiolocation, communication and telecommunication systems	111
Mohammed Kh.S.A. Device for control and measurement of temperature field in non-isothermal gas and liquid flows by a semiconductor one-dimensional quasistatic distributed sensor	117
Gorbunov I.A., Karamov F.A., and Startsev S.A. Integrators of discrete action in designing the devices of modern radio systems	124

УДК 535.8

# ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ГРАНИЦЫ ПРОПУСКАНИЯ УФ-ФИЛЬТРА ПРИ НАНЕСЕНИИ ПЛЕНОК ОКСИДА ГАФНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОННОГО АССИСТИРОВАНИЯ

# И.С. Гайнутдинов, Е.А. Муравьев, И.Д. Малафеев, А.М. Хасанов, А.Ю. Кольцов

Приведены основные сведения об особенностях изготовления интерференционных покрытий для ультрафиолетовой области спектра на основе оксида гафния II (HfO<sub>2</sub>) с использованием ионного ассистирования. Показана зависимость свойств тонких пленок HfO<sub>2</sub> от условий нанесения пленки, т.е. от скорости конденсации, давления в вакуумной камере, температуры подложки и параметров источника ионного ассистирования. Приведены данные о сдвиге спектральной характеристики пленок HfO<sub>2</sub> под воздействием влаги.

Ключевые слова: интерференционные покрытия, ультрафиолетовые покрытия, пленки оксида гафния, ионное ассистирование.

#### Введение

В настоящее время интерес представляют интерференционные покрытия, наносимые на подложку с использованием источника ионного ассистирования (IAD – Ion Assisted Deposition). IAD – это вариант процесса конденсации пленкообразующих материалов с использованием электронного пучка, который добавляет поток ионов с высокой энергией, направленный на подложку. Эти ионы трамбуют атомы испаряемых материалов, тем самым создавая более высокую плотность пленки, чем в случае термического или электронно-лучевого испарения. С помощью измерений рентгеновской дифракции, принцип и назначение которых описаны в работах [1, 2], можно считать, что пленки с покрытием, полученным с использованием ионного ассистирования, демонстрируют частичную моноклинную кристаллическую структуру, тогда как пленка, нанесенная обычными методами, является аморфной. Результатом более высокой плотности покрытия является улучшенная механическая прочность, большая устойчивость к окружающей среде и меньший разброс по спектру, чем у пленок, полученных с использованием только испарения электронным лучом. Параметры ионного потока ассистента могут плавно изменяться от минимального до максимального уровня для каждого слоя индивидуально, что также делает процесс гибким. В частности, IAD позволяет изменять внутреннее напряжение покрытия во время осаждения, в некоторых случаях изменяя общее напряжение пленки от растяжения до сжатия.

В данном исследовании будет рассмотрен вопрос о получении влагоустойчивых пленок оксида гафния с использованием ионного ассистирования для их применения в покрытиях на ультрафиолетовую область спектра.

Оксид гафния является превосходным материалом для использования в ультрафиолетовом диапазоне из-за его спектральной границы с низким поглощением и высоким показателем преломления [3, 4]. Однако для использования оксида гафния в качестве материала при производстве ультрафиолетовых фильтров необходимо решить структурную проблему пленки [5]. Пленки оксида гафния, осажденные методом электронно-лучевого испарения, имеют столбчатую микроструктуру, которая позволяет вводить водяной пар и воздух в поры пленки [6]. Такие пленки демонстрируют спектральный сдвиг при воздействии влаги в атмосфере, которая конденсируется в пустотах пленки и изменяет эффективный показатель преломления пленки.

Плотность пленок оксида гафния может быть значительно увеличена, когда растущая пленка подвергается ионной бомбардировке [7–12]. В работе [7] было обнаружено, что пленки гафния луч-

ше испаряются при помощи реактивного ионного процесса, когда аргон используется в качестве исходного ассистирующего газа. Кроме того, было обнаружено, что показатель преломления пленок оксида гафния увеличивается с повышением величины ионного импульса источника ассистирования. В работе [10] была показана связь структурных свойств пленок оксида гафния с величиной ионного пучка, а также обнаружено, что плотность пленки увеличивается с увеличением величины ионного импульса

Интерес к данной теме вызван возможностью дальнейшего применения влагоустойчивых покрытий для улучшения характеристик изготавливаемого нами ультрафиолетового фильтра, описанного в [13].

#### Экспериментальная часть

Для проведения процессов формирования пленок использовали установку ORTUS-700, позволяющую в едином технологическом цикле производить электронно-лучевое/термическое испарение и ионную бомбардировку. Факторами, определяющими влияние качества пленок гафния, были давление в камере, скорость осаждения, исходный газовый состав ионной пушки и ток ионной пушки. Проведено 36 экспериментов с целью поиска оптимальных параметров использования ионного ассистирования совместно с электронно-лучевым испарением. Напыление HfO<sub>2</sub> проводили в камере с кислородноаргоновой (O<sub>2</sub>-Ar) атмосферой. Контроль роста пленки осуществлялся с помощью системы контроля толщины Inficon SQM-160, толщина пленки составляла 3000 Å. Источник ионного ассистирования – ионная пушка «Стрелок-2М».

При сравнении кривой пропускания HfO<sub>2</sub> с использованием ионного ассистирования и без него наблюдается ее сдвиг, что свидетельствует об уплотнении структуры пленки и увеличении ее показателя преломления (рис. 1). Похожие данные о повышении показателя преломления гафния от 2 до 2,11 при 350 нм с помощью ионного ассистирования были получены в работе [11].



Рис. 1. Спектральная характеристика слоя HfO<sub>2</sub> толщиной 3000 Å, нанесенного на подложку из стекла KУ1 без ионного ассистирования и с ионным ассистированием, где *T* – пропускание, λ – длина волны

Мы не измеряли энергию, или поток ионов, падающих на подложку. Однако в работе [14] были измерены функции распределения энергии ионов для ионной пушки Denton Vacuum CC-105, установленной в системе. Исходя из измерений [14] при близком значении тока возбуждения и токе ионной пушки и учитывая характеристики нашего источника ионного ассистирования, можно предположить, что наши средние значения энергии ионов порядка 100 эВ.

С учетом наших знаний о стабильном рабочем диапазоне системы вакуумного осаждения были выбраны соответствующие максимальные и минимальные значения для каждого определяющего фактора. Давление в камере при каждом прогоне поддерживалось постоянным между  $1,5-3\times10^{-2}$  Па или  $3-4,5\times10^{-2}$  Па. Ток ионной пушки составлял 0,5; 1; 1,5А. Напряжение анода составляло 130, 150, 170 В. Исходную газовую смесь выбирали следующим образом: только кислород, только аргон или смесь двух реактивных газов в одинаковом соотношении, причем в этом случае аргон подавался в ионный ассистент, а кислород к тигелю. Скорость осаждения была в диапазоне 2...Å/c. Скорость осаждения определялась из изменения массы пленки на кристалле во время осаждения. Отношение массы пленки к ее толщине зависит от плотности пленки, которая связана с величиной давления в камере и параметрами ионной пушки. В связи с этим скорость осаждения не является полностью независимой переменной. Мы провели эксперименты, в которых пленки оксида гафния осаждались с использовани-

ем всех возможных комбинаций давления в камере, скорости осаждения, тока ионной пушки и газа ионной пушки.

Измерения спектральных характеристик, полученных в ходе эксперимента проводились на спектрофотометре Perkin Elmer Lambda 950, результаты представлены в табл. 1.

гезультаты экспериментов напыления п102 с ионным ассистированием								
Номер	Давление,	Скорость	Ток анода,	Ar:O.	Напряжение	<i>T</i> , %		
образца	×10 <sup>-2</sup> Па	испарения, Å/с	Α	AI.0 <sub>2</sub>	анода, В	на 250 нм		
1	1,5-3	2-3	0,5	0:1	130	70		
2	1,5-3	2-3	0,5	1:0	130	72		
3	1,5-3	2-3	0,5	1:1	130	78		
4	1,5-3	3-4	0,5	0:1	130	68		
5	1,5-3	3-4	0,5	1:0	130	70		
6	1,5-3	3-4	0,5	1:1	130	73		
7	1,5-3	2-3	1	0:1	150	73		
8	1,5-3	2-3	1	1:0	150	76		
9	1,5-3	2-3	1	1:1	150	80		
10	1,5-3	3-4	1	0:1	150	72		
11	1,5-3	3-4	1	1:0	150	78		
12	1,5-3	3-4	1	1:1	150	83		
13	1,5-3	2-3	1,5	0:1	170	69		
14	1,5-3	2-3	1,5	1:0	170	71		
15	1,5-3	2-3	1,5	1:1	170	75		
16	1,5-3	3-4	1,5	0:1	170	69		
17	1,5-3	3-4	1,5	1:0	170	71		
18	1,5-3	3-4	1,5	1:1	170	75		
19	3-4,5	2-3	0,5	0:1	130	68		
20	3-4,5	2-3	0,5	1:0	130	70		
21	3-4,5	2-3	0,5	1:1	130	76		
22	3-4,5	3-4	0,5	0:1	130	63		
23	3-4,5	3-4	0,5	1:0	130	65		
24	3-4,5	3-4	0,5	1:1	130	72		
25	3-4,5	2-3	1	0:1	150	66		
26	3-4,5	2-3	1	1:0	150	68		
27	3-4,5	2-3	1	1:1	150	70		
28	3-4,5	3-4	1	0:1	150	62		
29	3-4,5	3-4	1	1:0	150	65		
30	3-4,5	3-4	1	1:1	150	68		
31	3-4,5	2-3	1,5	0:1	170	71		
32	3-4,5	2-3	1,5	1:0	170	73		
33	3-4,5	2-3	1,5	1:1	170	64		
34	3-4,5	3-4	1,5	0:1	170	67		
35	3-4,5	3-4	1,5	1:0	170	70		
36	3-4,5	3-4	1,5	1:1	170	72		

Результаты экспериментов напыления HfO<sub>2</sub> с ионным ассистированием

Перед началом серии экспериментов было замечено, что сама ионная пушка заставляла подложку становиться более поглощающей в ультрафиолетовой области. Во время работы ионной пушки при отсутствии осаждения материалов пропускание подложки при 250 нм линейно уменьшалось в зависимости от времени работы ионной пушки. Мы посчитали первоисточником этого загрязнения катод ионной пушки. Чтобы исследовать эту проблему загрязнения, ионная пушка была включена на 10 мин при постоянных условиях с различными материалами катода: ток ионной пушки – 0,85 A; напряжение – 150 B; давление в камере –  $3 \times 10^{-2}$  Па; исходный газ – аргон. Спектральную характеристику пропускания опытной подложки из вакуумной камеры сравнивали со спектральной характеристикой чистой (эталонной) подложки. Первоначальным материалом катода был сплав, состоящий преимущественно из никеля, хрома и молибдена. При 250 нм пропускание опытной подложки было на 4 % меньше, чем у чистой подложки. Катод, состоящий в основном из молибдена, был испытан следующим при тех же условиях. Было обнаружено, что пропускание подложки при 250 нм улучшилось примерно на 2 %. Наконец, вольфрам фигурировал в качестве материала катода. Пропускание улучшилось еще на 2 %, было похоже на пропускание эталонной подложки. Мы объясняем это более низкой скоростью распыления вольфрама по отношению к другим исследуемым материалам. Все результаты, представленные в этой статье, были получены с использованием вольфрамового катода. График кривых пропускания подложки с различными катодами представлен на рис. 2. Также было обнаружено, что пленки оксида гафния, осажденные с ионным ассистированием, демонстрируют больший коэффициент поглощения ( $k = 3-5 \times 10^{-4}$  при 300 нм), чем пленки, полученные без ионного ассистирования [7].



Рис. 2. График кривых пропускания подложки с различными катодами

Полученные пленки оценивались экспресс-методом на стабильность спектральной границы пропускания и поглощения влаги при длине волны ( $\lambda$ ) 286 нм. Сначала были замерены образцы пленок при постоянной комнатной температуре (25 °C) в сухом кюветном отделении спектрофотометра Perkin Elmer Lambda 950. Затем образцы пропитывали водой в течение 5 мин, а затем снова измеряли пропускание в условиях окружающей среды.

Результаты измерений десяти подложек с нанесенными на них пленками HfO<sub>2</sub> (IAD) представлены в табл. 2.

Сдвиг ( $\Delta T$ ) был определен как:  $T_{\text{влаж}} - T_{\text{сух}}$ , где  $T_{\text{влаж}}$  – величина пропускания образцов после контакта с водой,  $T_{\text{сух}}$  – величина пропускания образцов в сухой среде.

на влагоустойчивость								
Номер образца	$T_{\rm cyx}$ , %	Т <sub>влаж</sub> , %	Сдвиг ( <i>ΔT</i> ), %					
1	3	3,5	0,5					
2	2,2	2,8	0,6					
3	1	1,4	0,4					
4	2	2,8	0,8					
5	1,3	1,9	0,6					
6	0,9	1,3	0,4					
7	1,8	2,3	0,5					
8	2,3	2,7	0,4					
9	1,7	2,2	0,5					
10	1,1	1,4	0,3					

	Таблица 2
Сдвиг спектральной характеристики HfO2	при экспериментах
на влагоустойчивость	

Из полученных данных было обнаружено, что аргон в качестве газа ассистента оказывает большое влияние на величину сдвига влаги и не оказывает большого влияния на пропускание в ультрафиолетовом диапазоне, и наоборот, кислород, подаваемый к источнику ионного ассистирования, сильно влияет на величину пропускания в ультрафиолетовой области, но мало влияет на сдвиг влаги. Давление в камере влияет как на сдвиг влаги, так и на пропускание ультрафиолетового излучения, но на сдвиг влаги оно влияет больше, чем на величину пропускания. Ток ионной пушки оказывает почти одинаковое влияние на оба варианта. Скорость осаждения оказывает минимальное влияние на пропускание и сдвиг при любых условиях.

#### Результаты

В результате исследования было обнаружено, что лучшие пленки  $HfO_2$  получаются со смесью аргона и кислорода в отношении 1:1 (Ar = 3 см<sup>3</sup> к источнику ионного ассистирования и  $O_2 = 3$  см<sup>3</sup> к тигелю с испаряемым материалом). При этом суммарное давление газовой смеси при напылении должно быть  $1,8-3\times10^{-2}$  Па, скорость осаждения – 3 Å/с, температура в вакуумной камере – 140 °C, ток ионной пушки – 1А. Пленки  $HfO_2$  наносились на подложку из оптического стекла марки KУ1 ø 30 мм и толщиной 3 мм.

Были получены данные об изменении величины пропускания в ультрафиолетовой области спектра и показателях влагоустойчивости пленок HfO<sub>2</sub>, нанесенных с помощью ионной пушки «Стрелок-2М» при использовании различных комбинаций ассистирующих газов. Пленки, осажденные при подаче кислорода к ионной пушке, демонстрируют большие сдвиги влаги, а пленки, осажденные при подаче аргона к ионной пушке, низкое пропускание в ультрафиолетовом диапазоне. Вероятно, что пленки, осажденные только аргоном в качестве исходного газа, не полностью окислены. Ионы аргона более массивны, чем ионы кислорода, и более высокая энергия может вызвать преимущественное распыление кислорода из растущей пленки. Использование только кислорода как исходного газа может не обеспечивать достаточно высокие энергетические импульсы ионов, необходимые для получения плотной пленки. Достижение приемлемых результатов возможно только при использовании смеси аргона и кислорода в описанном соотношении.

Исследования в этом направлении будут продолжаться с целью применения в составе ультрафиолетового фильтра подобных пленок, нанесенных с помощью ионного ассистирования, для увеличения характеристик стабильности границы пропускания при климатическом воздействии в долгосрочной перспективе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гинье А. Рентгенография кристаллов. Теория и практика. М.: Наука, 1961. 604 с.
- 2. Хейкер Д.М., Зевин Л.С. Рентгеновская дифрактометрия. Физико-математическая библиотека инженера. М.: Физматгиз, 1963. 380 с.
- 3. *Rainer F. et al.* Materials for optical coatings in the ultraviolet // Appl. Opt. 1985. Vol. 24. Iss. 4. P. 496–500.
- 4. *Baumeister P., Arnon O.* Use of hafnium dioxide in multilayer dielectric reflectors for the near UV // Appl. Opt. 1977. Vol. 16. Iss. 2. P. 439–444.
- 5. *Jensen T.R. et al.* Environmentally stable UV Raman edge filters // Proc. of the Annu. Tech. Conf. 2000, P. 239–243.
- 6. Anzellotti J.F. et al. Stress and environmental shift characteristics of HfO2/SiO2 multilayer coatings // Proc. of the SPIE, 1997, Bellingham, WA. P. 258–264.
- 7. *Lehan J.P. et al.* Optical and microstructural properties of hafnium dioxide thin films // Thin Solid Films. 1991. Vol. 203. Iss. 4. P. 227–250.
- 8. *Gilo M., Croitoru N.* Study of HfO<sub>2</sub> films prepared by ion-assisted deposition using a gridless end-hall ion source // Thin Solid Films. 1999. Vol. 350. Iss. 1-2. P. 203–208.
- 9. Gotzelmann R., Hagedorn H., Zoller A. UV coatings produced with plasma-ion-assisted // Proc. of the SPIE, 1999. P. 48–57.
- 10. Alvisi M. et al. Structural and optical modifi // Thin Solid Films. 1999. Vol. 354. Iss. 1-2. P. 19-23.
- 11. *McNally J.J. et al.* Ion beam assisted deposition of optical thin films recent results // Proc. of the SPIE, 1985. P. 479-485.
- 12. Fan Bin, Suzuki Masahiro, Tang Ken. Ion-assisted deposition of TiO2/SiO2 multilayers for mass production // Applied Optics. Vol. 45. Issue 7. P. 1461–1464, (2006).
- 13. *Муравьев Е.А., Малафеев И.Д.* Особенности изготовления покрытий для «солнечно-слепого» ультрафиолетового фильтра на вакуумной установке «ORTUS 700» // Контенант. Т. 15. № 4. С. 12–15, (2016).
- 14. Zabeida O. et al. Ion bombardment characteristics during the growth of optical films using a cold cathode ion source // Proc. of the Annu. Tech. Conf., 1999. P. 267–271.

Поступила в редколлегию 7.12.18

# IMPROVING THE STABILITY OF THE SPECTRAL LIMIT OF TRANSMISSION OF THE UV FILTER IN APPLYING FILMS OF HAFNIUM OXIDE USING ION ASSISTANCE

### I.S. Gainutdinov, E.A. Murav'ev, I.D. Malafeev, A.M. Khasanov, and A.Yu. Kol'tsov

This paper provides basic information about the features of manufacturing the interference coatings for the ultraviolet region of the spectrum based on hafnium oxide II (HfO<sub>2</sub>) using ion assistance. The dependence of the properties of thin HfO<sub>2</sub> films on the conditions of film deposition, i.e. on the condensation rate, the pressure in the vacuum chamber, the temperature of the substrate and the parameters of the ion assist source. The data on the shift of the spectral characteristics of HfO<sub>2</sub> films under the influence of moisture are given.

Keywords: interference coatings, ultraviolet coatings, hafnium oxide films, ion assistance.

Гайнутдинов Ильдус Саляхович – д-р техн. наук, академик РАН (АО «НПО "ГИПО"», Казань) E-mail: zrainz@mail.ru

**Муравьев Евгений Александрович** – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: zrainz@mail.ru

Малафеев Илья Дмитриевич – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: mzizdz@gmail.com

**Хасанов Альмаз Минзихатович** – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: almazgnap@yandex.ru

Кольцов Алексей Юрьевич – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: king44@yandex.ru

# ИЗМЕНЕНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ В ПРОЦЕССАХ ДРОБЛЕНИЯ И КОАГУЛЯЦИИ КАПЕЛЬ

#### Н.А. Тукмакова

Представлены математическая модель и результаты моделирования течения полидисперсной парокапельной смеси в теплообменнике-регазификаторе, конструкция которого представляет собой трубу Фильда, с учетом процессов дробления и коагуляции капель. В результате расчетов получены характеристики движения полидисперсной парокапельной смеси – изменение температуры, радиусов частиц различных фракций и плотностей фаз со временем.

Ключевые слова: математическая модель, полидисперсная парокапельная смесь, течение парокапельной смеси, дробление и коагуляция капель.

Рассмотрено течение полидисперсной двухфазной смеси в теплообменнике-регазификаторе [1], представляющем собой два концентрических канала – трубу Фильда. Движение двухфазной смеси моделировалось с учетом процессов дробления и коагуляции капель. Динамика несущей среды – газообразного метана – описывалась системой уравнений Навье – Стокса [2 - 5], куда входили уравнение неразрывности для плотности несущей среды, уравнения сохранения компонент импульса [6] и уравнение сохранения полной энергии несущей среды с учетом обмена импульсом и энергией с дисперсными фракциями. Каждая дисперсная фракция описывалась системой уравнения компонент импульса и уравнение сохранения сохранений плотности дисперсной фракции, уравнения сохранения компонент импульса и уравнение сохранения тепловой энергии дисперсной фракции с учетом обмена импульсом и энергией с несущей средой [7]. Дисперсная фракция состояла из пяти капельных фракций метана, капли имели сферическую форму. В качестве уравнений состояния использовались как уравнение состояния идеального газа, так и широкодиапазонное малоконстантное уравнения Бенедикта – Вебба – Рубина [8].

Скорость движения капель относительно несущей среды может изменяться, например, при изменении геометрии канала. В этом случае могут возникать условия для перехода от режима дробления капель отдельных фракций к режиму их коагуляции. Критерием является число Вебера  $We = 2r_i\rho_* |V - V_i|^2/\sigma$ , где  $r_i$  – радиус капли;  $\rho_*$  – плотность жидкости, образующей каплю; V – скорость несущей среды;  $V_i$  – скорость *i*-й дисперсной фракции;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости капли. Будем считать, что если для частицы *i*-й фракции число Вебера больше критического значения, лежащего в диапазоне значений 2...10, то движение такой частицы сопровождается газодинамическим дроблением, приводящим к уменьшению массы частицы *i*-й фракции. Если число Вебера для некоторой фракции капель в потоке оказывается меньше критического, то процесс дробления капель данной фракции сменяется процессом их коагуляции с каплями меньших размеров. В приведенных ниже расчетах принято, что критическое значение числа Вебера We<sub>кр</sub> = 10.

#### Модель дробления капель

В качестве механизма разрушения капли выбран тарельчатый тип дробления, связанный со срывом пограничного слоя [9], реализующийся при We<sub>кp</sub>  $\leq$  We  $< 1,7\cdot10^4$ /Lp<sup>0,5</sup>, где Lp – число Лапласа, Lp =  $\rho\sigma 2r_i/\mu^2$ . При этом диаметр d отрывающихся частиц  $d = 2,4 \frac{d_i}{\sqrt{\text{Re}_{i0}}} \left(\frac{\mu_{\#}}{\mu}\right)^{0.5} \left(\frac{\rho}{\rho_{\#}}\right)^{0.25}$ , где  $d_i$  –

диаметр капель *i*-й фракции; µ<sub>ж</sub>, µ, ρ<sub>ж</sub>, ρ – коэффициенты динамической вязкости и плотность жидкости и газа [9]. Для описания процесса потери каплей массы при газодинамическом дроблении применимо полуэмпирическое уравнение [9]:

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = -m_1 \frac{K_1 (\text{We})^{\Psi} (\text{Re})^{\omega}}{t_i} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{K_2 t}{t_i}\right) \right],\tag{1}$$

где  $m_1 = \frac{\pi d^3 \rho_{\pi}}{6}$ ;  $K_1 = 2, 4 \div 7, 5$ ;  $K_2 = 1, 1$ ;  $\psi = 0, 8 \div 1, 3$ ;  $\omega = -0, 15 \div 0, 2$ .

ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 1

Здесь  $m_1$  – масса отрывающейся при дроблении капли;  $m_i$  – масса дробящейся капли *i*-й фракции; t – интервал времени с момента достижения критического значения числа Вебера для капли *i*-й фракции;  $t_i$  – время от начала деформации капли до начала ее дробления [9]:

$$t_i = 0.37 \frac{d_i}{|\mathbf{V} - \mathbf{V}_i|} \sqrt{\frac{\rho_{\pi}}{\rho}}$$

Для решения обыкновенного дифференциального уравнения (1) применяется метод рядов. Приближенное решение уравнения (1) представляется в виде отрезка ряда Тейлора до второго порядка точности по времени включительно:

$$m_{i}(t + \Delta t) = m_{i}(t) + \frac{\partial m_{i}}{\partial t} \Delta t + \frac{1}{2} \frac{\partial^{2} m_{i}}{\partial t^{2}} (\Delta t)^{2} + O((\Delta t)^{3});$$
  

$$\frac{\partial m_{i}}{\partial t} = -m_{1} \frac{K_{1}(We)^{\Psi}(Re)^{\omega}}{t_{i}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{K_{2}t}{t_{i}}\right) \right];$$
  

$$\frac{\partial^{2} m_{i}}{\partial t^{2}} = -m_{1} \frac{K_{1}(We)^{\Psi}(Re)^{\omega}}{t_{i}^{2}} K_{2} \exp\left(-\frac{K_{2}t}{t_{i}}\right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{K_{2}t}{t_{i}}\right) \right],$$
  
(2)

где  $m_1 = \frac{\pi d^3 \rho_{\text{ж}}}{6}$ ;  $K_1 = 2, 4 \div 7, 5$ ;  $K_2 = 1, 1$ ;  $\psi = 0, 8 \div 1, 3$ ;  $\omega = -0, 15 \div 0, 2$ .

Значение массы капли в текущий момент времени t известно. Значение на следующем временном шаге определяем в виде отрезка ряда Тейлора (2). Зная массу дробящейся капли *i*-й фракции на новом временном шаге, найдем ее новый радиус и объем. Известное значение концентрации капель *i*-й фракции позволяет найти объемное содержание и новое значение средней плотности *i*-й фракции. Далее считаем, что отрывающиеся при дроблении капли переходят в самую мелкую фракцию смеси, в результате чего увеличивается средняя плотность и концентрация капель самой мелкой фракции капель. Далее определяем число Вебера для капель *i*-й фракции, сравниваем с критическим значением и либо переходим к выполнению расчетов течения газовзвеси на следующем временном слое, либо рассчитываем процесс коагуляции капель ряда фракций, включающих в себя *i*-ю фракцию в качестве самой крупной.

#### Модель коагуляции капель

Процесс коагуляции капель описывается лагранжевой моделью Смолуховского [10], в соответствие с которой, если число Вебера для частицы *i*-й фракции меньше критического значения, то при ее столкновениях с частицами менее крупных фракций происходит их коагуляция, вследствие чего изменяется масса, концентрация, импульс и температура частицы *i*-й фракции.

Масса  $m_i$  частицы *i*-й фракции (i = 2,...n) возрастает за счет поглощения частиц *j*-х фракций меньшего размера с массой  $m_j$  (j = 1, 2,...i-1):

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} n_j m_j ,$$

где  $k_{ij} = K_0 \frac{\pi}{4} (d_i + d_j)^2 \sqrt{(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2 + (w_i - w_j)^2}$  – константа коагуляции;  $d_i$  – диаметр частиц *i*-й

фракции,  $d_i > d_j$ . Новое значение массы частиц *i*-й фракции в текущем узле конечно-разностной сетки позволяет определить новое значение радиуса частицы  $r_i$ . Уменьшение концентрации частиц *j*-х фракций вследствие поглощения их более крупными *i*-ми (i = j + 1, j + 2, ...n) описывается уравнением:  $\frac{\partial n_j}{\partial t} = -n_j \sum_{i=j+1}^n k_{ij} n_i$ , (i = 1, 2, ...n - 1). Новое значение объемного содержания *i*-й фракции, изменившееся

вследствие коагуляции, определяется как  $\alpha_I = 4/3 \pi r_i^3 n_i$ . Концентрация  $n_i$  определяется через среднюю плотность и радиус частиц *i*-й фракции на каждом шаге вычислений. Слияние мелких капель с более крупными приводит к изменению их импульса и скорости:  $\frac{\partial w_i}{\partial t} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} (w_j - w_i) m_j n_j$ . Температура

частицы і-й фракции после коагуляции с частицами более мелких фракций находилась из соотношения

$$T = \frac{1}{Cm} \left( \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} n_j C_j m_j T_j + C_i m_i T_i \right),$$
где *T*, *C*, *m* – температура, удельная массовая теплоемкость и масса

частицы *i*-й фракции после коагуляции; *T<sub>i</sub>*, *C<sub>i</sub>*, *m<sub>i</sub>* – те же параметры до коагуляции. Связанные с коагуляцией изменения скорости и температуры дисперсной фазы учитывались на каждом временном шаге основного алгоритма.

### Результаты расчетов процесса движения полидисперсной парокапельной смеси с дроблением и коагуляцией капель

Пусть в системе находится пять дисперсных фракций с радиусами капель 1, 10, 20, 50 и 100 мкм. Несущей средой является газообразный метан, а дисперсные фракции – сферические капли жидкого метана. Расчеты были выполнены на сетке, включающей  $N_j \times N_k = 200 \times 100$  узлов. Температуры несущей среды и всех пяти дисперсных фракций в начальный момент времени совпадали и составляли 140 К. Начальное объемное содержание каждой дисперсной фракции составляло  $\alpha_i = 0,0001$ . Начальные скорости капель дисперсных фракций равны нулю, а начальная скорость несущей среды задавалась и в расчетах принимала значения 0,1; 0,15; 0,25 М, где М – число Маха. Такая постановка начальных условий описывает мгновенное внесение капель в поток, начальная плотность которого составляла 1,29 кг/м<sup>3</sup>, а физическая плотность вещества дисперсных фракций – жидкого метана – 416 кг/м<sup>3</sup>.

Пусть скорость несущей среды в начальный момент времени составляет 0,1 М. При мгновенном внесении капель в поток наибольшие числа Вебера для каждой из фракций достигаются в начальный момент времени и составляют: We (1 мкм) = 0,24; We (10 мкм) = 2,4; We (20 мкм) = 4,8; We (50 мкм) = 12; We (100 мкм) = 24. В качестве критического значения числа Вебера выбрано значение We = 10 [9]. В этом случае критическое число Вебера превышено для капель с начальными радиусами 50 и 100 мкм, которые начинают дробиться при t > 0. На рис. 1, *а* показана временная зависимость радиусов дисперсных фракции. На интервале времени 0 < t < 0,0001 с происходит резкое уменьшение радиуса дисперсной фракции с начальным радиусом 100 мкм. В результате дробления радиус капли этой фракции уменьшается от 100 до 42 мкм. При неизменной концентрации капель самой крупной фракции средняя плотность уменьшается пропорционально изменению объема капли:  $\rho_5(t=0) / \rho_5(t=0,0001) = (100 мкм/42 мкм)^3 = 13,5$ . Радиус капли следующей по величине фракции уменьшается от 50 мкм до 39 мкм. При этом средняя плотность фракции (рис. 1,  $\delta$ ) уменьшается как  $\rho_4(t=0) / \rho_4(t \approx 0,0001) = (50 мкм/39 мкм)^3 = 2,27$ . Размер фракций с радиусами 1, 10, 20 мкм остается постоянным, поскольку они не участвуют в процессе дробления (см. рис. 1).



На рис. 1, б показано изменение средних плотностей дисперсных фракций со временем. Вблизи начального момента времени происходит скачкообразное увеличение средней плотности мелкодисперсной фракции с радиусом капель 1 мкм. Это происходит вследствие дробления самой крупной и следующей по размеру дисперсных фракций с начальными радиусами 100 и 50 мкм. Суммарное уменьшение средней плотности дробящихся фракций совпадает с увеличением средней плотности равновесной

ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 1

с несущей средой мелкодисперсной фракции. Быстрое уменьшение радиусов дробящихся капель, а также уменьшение относительной скорости дисперсных фракций и несущей фазы уменьшает число Вебера так, что оно оказывается меньше критического значения для всех фракций. В результате процесс дробления прекращается и сменяется процессом коагуляции, при котором возрастают радиусы капель всех фракций, кроме самой мелкой (см. рис. 1, *a*). В процессе коагуляции уменьшается средняя плотность самой мелкой фракции являются донорами для всех остальных фракций, причем самая большая скорость роста средней плотности наблюдается у капель третьей и четвертой фракций, тогда как средняя плотность самой крупной фракции растет медленнее (см. рис. 1, *б*). Это, видимо, связано с малой концентрацией самой крупной фракции по сравнению с остальными фракциями, что уменьшает значение коэффициента коагуляции. Суммарная средняя плотность пяти дисперсных фракций на протяжении всего процесса при 0 < t < 0,007 с сохраняет начальное значение  $\rho_{\Sigma} = \Sigma \rho_i \approx 0,208$  кг/м<sup>3</sup>. В процессе коагуляции средняя плотность фракции с начальным размером 10 мкм медленно уменьшается (см. рис. 1, *б*).



На рис. 2, *а* показано, как меняются концентрации капель различных фракций. Начальный этап дробления сопровождается резким возрастанием концентрации капель самой мелкой фракции. Затем концентрации трех самых мелких фракций снижаются, поскольку они являются донорами для более крупных фракций в процессе коагуляции. На рис. 2, *б* представлены зависимости скоростей несущей среды и дисперсных фракций от времени. Мелкодисперсная фракция практически сразу разгоняется и движется вместе с несущей средой. На рис. 2, *б* кривые скорости несущей и равновесной с ней по скорости фракции совпадают. Скоростное запаздывание с увеличением размера дисперсных фракций увеличивается. В результате дробления радиусы третьей и пятой фракций оказываются близки, как следствие, близки и их скорости.

Рассмотрим, как увеличение скорости несущей среды оказывает влияние на динамику процесса. Пусть скорость несущей среды в начальный момент времени составляет 0,15 М. При температуре T = 140 К скорость звука в газообразном метане составляет  $(\gamma RT)^{1/2} = 308$  м/с, а начальная скорость несущей среды – 46,2 м/с. При мгновенном внесении капель в поток наибольшие числа Вебера для каждой из фракций достигаются в начальный момент времени и составляют: We (1 мкм) = 0,55; We (10 мкм) = 5,5; We (20 мкм) = 11; We (50 мкм) = 27,5; We (100 мкм) = 55. В этом случае критическое число Вебера превышено для капель с начальными радиусами 20, 50, 100 мкм, которые начинают дробиться. На рис. 3, а показана временная зависимость радиусов дисперсных фракций. На интервале времени  $0 \le t \le 0.00009$  с происходит резкое уменьшение радиуса дисперсной фракции с начальным радиусом 100 мкм. В результате дробления радиус капли этой фракции уменьшается от 100 до 20 мкм. При неизменной концентрации капель самой крупной фракции средняя плотность уменьшается пропорционально изменению объема капли:  $\rho_5(t=0)/\rho_5(t=0,00009) = (100 \text{ мкм}/20 \text{ мкм})^3 = 125$ . Радиус капли следующей по величине фракции уменьшается от 50 до 18 мкм. При этом средняя плотность фракции (см. рис. 1, б) уменьшается как  $\rho_4(t=0)/\rho_4(t\approx 0.0001) = (50 \text{ мкм} / 18 \text{ мкм})^3 = 21.4$ . Капли с начальным радиусом 20 мкм уменьшаются до 16 мкм. При этом средняя плотность этой фракции уменьшается от 0,0416 кг/м<sup>3</sup> до 0,02 кг/м<sup>3</sup> (см. рис. 3, б). Размер фракций с радиусами 1 и 10 мкм остается постоянным, поскольку они не участвуют в процессе дробления (см. рис. 3).



На рис. 3, б показано изменение средних плотностей дисперсных фракций со временем. После скачкообразного увеличения средней плотности мелкодисперсной фракции с радиусом капель 1 мкм, связанного с дроблением дисперсных фракций с начальным радиусами 100, 50, 20 мкм, начинается этап коагуляции. В течение всего процесса, включающего в себя и дробление, и коагуляцию, суммарное значение средней плотности фракций неизменно. На этапе дробления увеличение средней плотности равновесной с несущей средой по скорости фракции равно суммарному уменьшению средней плотности дробящихся фракций. Быстрое уменьшение радиусов дробящихся капель, а также уменьшение относительной скорости дисперсных фракций и несущей фазы уменьшает число Вебера так, что оно оказывается меньше критического значения для всех фракций. В результате процесс дробления прекращается и сменяется процессом коагуляции, при котором возрастают радиусы капель всех фракций, кроме самой мелкой (см. рис. 3, а). В процессе коагуляции быстро уменьшается средняя плотность самой мелкой фракции, так как капли этой фракции являются донорами для всех остальных фракций, причем самая большая скорость роста средней плотности достигается у капель третьей и четвертой фракции, тогда как средняя плотность самой крупной фракции и скорость ее роста очень мала (см. рис. 3, б) в силу малых после дробления радиусов и малой концентрации капель самой крупной фракции. Суммарная средняя плотность пяти дисперсных фракций на протяжении всего процесса при 0 < t < 0,0045 с близко к начальному значению  $\rho_{\Sigma} = \Sigma \rho_i \approx 0,208 \text{ кг/м}^3$ . Число Вебера для второй дисперсной фракции с начальным размером 10 мкм меньше критического, и данная фракция не участвует в процессе дробления. Поскольку радиус капель фракции также сравнительно мал, то мала и константа коагуляции.



На рис. 4, *а* показано, как меняются концентрации капель различных фракций при дроблении и последующей коагуляции. Начальный этап дробления сопровождается резким возрастанием концентрации капель самой мелкой фракции. Затем концентрации капель двух самых мелких фракций снижаются, поскольку они являются основными донорами для более крупных фракций в процессе коагуляции.

На рис. 4, б представлены зависимости скоростей несущей среды и дисперсных фракций от времени. Мелкодисперсная фракция практически сразу разгоняется и движется вместе с несущей средой. На рис. 4, б кривые зависимости скорости несущей среды от времени и равновесной с ней по скорости фракции совпадают. Начальная стадия – дробление – приводит к тому, что радиусы капель трех самых крупных фракций оказываются близки и составляют 16, 18, 20 мкм. В результате сближаются скорости капель этих фракций (см. рис. 4, б).

Увеличим скорость несущей среды до 0,25 М. При температуре T = 140 К скорость звука в газообразном метане составляет ( $\gamma RT$ )<sup>1/2</sup> = 308 м/с, а начальная скорость несущей среды 77 м/с. При мгновенном внесении капель в поток наибольшие числа Вебера для каждой из фракций достигаются в начальный момент времени и составляют: We (1 мкм) = 1,18; We (10 мкм) = 11,8; We (20 мкм) = 23,6; We (50 мкм) = 59; We (100 мкм) = 118. В этом случае критическое число Вебера превышено для капель всех фракций, кроме самой мелкой. На рис. 5, *а* показана временная зависимость радиусов дисперсных фракций. При t > 0 происходит резкое уменьшение радиусов капель дисперсных фракций с начальными радиусами 10, 20, 50, 100 мкм. В результате дробления радиус капель этих фракций уменьшается примерно до 6,5 мкм (см. рис. 5, *a*).



Дробление приводит к тому, что на начальном этапе средняя плотность мелкодисперсной фракции с радиусом капель 1 мкм резко возрастает с 0, 0416 до 0,14 кг/м<sup>3</sup>. Ровно на эту величину уменьшается суммарная средняя плотность дробящихся фракций (рис. 5,  $\delta$ ). Затем, когда дробление прекращается, начинается процесс коагуляции, сопровождающийся уменьшением средней плотности равновесной фракции (1 мкм) и ростом средней плотности остальных фракций. При этом можно отметить очень малую скорость роста средней плотности самой крупной фракции. В течение всего процесса, включающего как дробление, так и коагуляцию, суммарное значение средних плотностей всех фракций неизменно. На этапе дробления увеличение средней плотности равновесной с несущей средой по скорости фракции равно суммарному уменьшению средней плотности дробящихся фракций. Суммарная средняя плотность пяти дисперсных фракций на протяжении всего процесса при 0 < t < 0,0045 с близко к начальному значению  $\rho_{\Sigma} = \Sigma \rho_i \approx 0,208 \text{ кг/м}^3$ .

На рис. 6, *а* показано, как меняется концентрация частиц различных фракций в процессе дробления и коагуляции. Наибольшие изменения наблюдаются для концентрации капель самой мелкой фракции, которая быстро увеличивается при дроблении и снижается вследствие коагуляции.



На рис. 6, б представлены зависимости скоростей несущей среды и дисперсных фракций от времени. Поскольку по окончании процесса дробления радиусы капель всех фракций различаются мало и лежат в диапазоне 1...6,5 мкм, то и скорости капель всех фракций также оказываются близки.

В результате расчетов получены временные зависимости скорости несущей среды и дисперсных фракций, средних плотностей и концентраций дисперсных фракций, изменения радиусов частиц дисперсных фракций со временем, а также изменение во времени температуры несущей среды и дисперсных фракций. Тестирование проводилось для трех различных режимов, отличающихся друг от друга начальными скоростями несущей среды. Расчеты показали, что в начальный момент времени происходит дробление капель фракций, число Вебера для которых превышает критическое значение. С увеличением начальной скорости движения несущей среды число фракций, участвующих в процессе дробления, увеличивается. Последующее уменьшение числа Вебера ниже критического значения вследствие уменьшения скорости и радиусов частиц дисперсных фракций приводит к коагуляции частиц.

Работа была выполнена в рамках гранта РФФИ 18-48-160017 «Разработка конструкции тепловоспринимающих элементов регазификатора-подогревателя сжиженного природного газа на основе анализа структуры полидисперсных парокапельных потоков, формирующейся с учетом механизмов конденсации, испарения, дробления и коагуляции», 2018–2019 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Технологический нагреватель: пат. 2467260 Рос. Федерация, № 2011100380/06; заявл. 11.01.2011; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32.
- 2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука. Физматлит, 1987. Ч. 1. 464 с.
- 3. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. // СПБ.: Недра, 2003. 283 с.
- 4. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир. 1991. Т. 2. 551 с.
- 5. Steger J.L. Implicit Finite-Difference Simulation of Flow about Arbitrary Two-Dimensional Geometries // AIAA J. 1978. Vol. 16. № 7. P. 679–686.
- 6. Самойлович Г.С. Гидрогазодинамика. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
- 7. Тукмаков А.Л., Тонконог В.Г., Арсланова С.Н. Волновая коагуляция полидисперсной газовзвеси в технологии газификации и криостатирования сжиженного природного газа // Акустический журнал. 2016. № 1. С. 125–131.
- 8. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. // 3-е изд., перераб. и доп. Л.: «Химия». Ленинградское отделение, 1982. 496 с.
- 9. Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В. Моделирование процесса дробления и испарения капель нереагирующей жидкости в высокоэнтальпийных газодинамических потоках // Теплофизика и аэромеханика. 2015. № 5. С. 609–620.
- 10. Алемасов В.Е. и др. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник: в 5 т. М.: ВИНИТИ, 1971. Т. 1. Методы расчета. 267 с.

Поступила в редколлегию 7.12.18

# CHANGING OF THE TWO-PHASE MIXTURE DISPERSITY IN THE FRAGMENTATION AND COAGULATION PROCESSES OF DROPLETS

#### N.A. Tukmakova

This paper presents the mathematical model and results of simulating the polydisperse vapor-droplet mixture flow in the heat exchanger-gasifier made in the form of a Field-tube boiler, taking into account the fragmentation and coagulation processes of droplets. As a result of calculations, the characteristics of polydisperse vapor-droplet mixture moving—the time curves of temperature, radiuses of particles of various fractions and density of phases—are obtained.

Keywords: mathematical model, polydisperse vapor-droplet mixture, vapor-droplet flow, fragmentation and coagulation of droplets.

**Тукмакова Надежда Алексеевна** – ассистент (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: nadejdatukmakova@ya.ru

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ВНЕЗАПНО ПРИВЕДЕННЫЙ В ДВИЖЕНИЕ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДР

### В.Г. Гумеров

Рассматриваются начальные моменты поперечного обтекания внезапно приведенного в движение кругового цилиндра после отрыва одного из первых двух вихрей. Методом интегрирования давления на поверхности в нестационарном потоке получена зависимость силы, действующей на цилиндр. Такая же зависимость силы получена и импульсным способом, учитывающим одинаковости скоростей жидкости в центре внешнего вихря и вихря в точке инверсии внутри цилиндра. С применением полученной формулы силы, приложенной к точке инверсии, выведена функция крутящего момента в зависимости от координат и интенсивности вихря, а также от поступательной скорости.

Ключевые слова: скорость жидкости внутри круга, скорость вихря в точке инверсии, импульсный метод расчета, вертикальный старт летательного аппарата, малые порывы ветра.

#### Введение

В начальный момент течение около внезапно приведенного в движение кругового цилиндра является безотрывным. Вскоре после начала движения в результате действия сил трения поток отрывается от поверхности и слева и справа образуется по одной вихревой пелене. Экспериментальные исследования показывают, что вихревые пелены в начальные моменты движения сворачиваются за цилиндром в симметричные вихри или вихревые облака. В силу неустойчивости симметричного развития вихрей [1] один из них отдаляется от цилиндра, а другой втягивается за цилиндр и продолжает развиваться. При развитии ближний вихрь совершает колебательные движения за цилиндром. Через некоторое время вихревая пелена, связывающая отдаленный вихрь с точкой отрыва потока от поверхности, отрывается около цилиндра, и образуется новый вихрь с малой интенсивностью. Оторвавшийся вихрь уносится потоком, а новый развивающийся вихрь постепенно вносится в область между цилиндром и развившимся до значительных размеров основным вихрем, имеющим большую интенсивность. После отрыва основного вихря начинается периодическое сбрасывание вихрей слева и справа со средними интенсивностями. Здесь влияния оторвавшегося и нового вихрей на движение жидкости вблизи цилиндра будем считать незначительными, так как первый движется на большом удалении, а второй имеет сравнительно малую интенсивность. В связи с этим практический интерес представляют сила и момент, действующие на цилиндр, в процессе развития основного вихря. Например, такая картина обтекания будет наблюдаться даже при небольших порывах ветра в моменты вертикального старта осесимметричных летательных аппаратов.

В настоящей работе зависимости силы и крутящего момента определяются в фиксированный момент развития основного вихря. Зависимость силы выводится импульсным способом и интегрированием давления, а крутящего момента – только импульсным способом.

#### Постановка задачи

Пусть заданы скорость поступательного потока  $V_{\infty}$ , радиус цилиндра R, координаты  $z_1 = r \exp(i\varphi)$  и интенсивность  $\Gamma$  основного вихря ( $\Gamma < 0$ ) (рисунок). Требуется определить зависимости силы и крутящего момента импульсным способом, с применением функции скорости жидкости внутри круга  $V = V_{\infty} (1 - z^2/R^2)$ . Вывод функции скорости внутри круга и ее основные свойства приведены в работе [2].



Правильность полученной импульсным способом функции силы требуется проверить сравнением с формулой силы, определенной методом интегрирования давления на поверхности цилиндра в неустановившемся потоке. Необходимо также показать, что зависимость силы, определенная импульсным способом, но распространением функции внешней скорости жидкости от поступательного потока  $V = V_{\infty} \left(1 - R^2/\overline{z}^2\right)$  на внутренние точки круга не совпадает с формулой силы, полученной интегрированием давления.

#### Вывод зависимостей силы и момента импульсным способом

Для определения силы F импульсным способом должны быть известны скорость жидкости  $V_f$  в точке инверсии  $z_i$  внутри круга, а также скорость движения самого инверсионного вихря  $V_v$ . Известно, что при наличии внешнего вихря непроницаемость контура круга обеспечивается расположением в точке инверсии такого же вихря, но противоположно направленной циркуляцией [3]. Кроме того, функция скорости жидкости внутри круга от поступательного потока  $V = V_{\infty} (1 - z^2/R^2)$  показывает, что скорость жидкости в точке инверсии равна скорости внешнего вихря [2]. Следовательно, суммарная скорость жидкости в точке инверсии равна скорости движения внешнего вихря, Паким образом, определение скорости жидкости  $V_f$  в точке инверсии сводится к нахождению скорости движения внешнего вихря  $V_1$  от поступательного потока, инверсионного и центрального вихрей. Что касается скорости инверсионного вихря, то она определяется производной зависимости точки инверсии  $z_i = R^2/\overline{z_1}$  по времени, т.е.  $V_v = dz_i/dt = -R^2/r^2 \cdot \exp(i2\varphi) \cdot \overline{V_1}$ .

Комплексный потенциал скорости W внешнего течения выражается формулой

$$W = V_{\infty} \left( z + R^2 / z \right) - i \, \Gamma / 2\pi \left( \ln \left( z - z_1 \right) - \ln \left( z - R^2 / \overline{z_1} \right) + (1 - d) \ln z \right).$$
(1)

Здесь *d* показывает дополнительно введенную интенсивность центрального вихря. Скорость движения внешнего вихря, совпадающая с местной скоростью жидкости, будет равна

$$V_1 = V_{\infty} \left( 1 - \frac{R^2}{\overline{z}_1^2} \right) - i \, \Gamma / 2\pi \cdot \frac{1}{(\overline{z}_1 - \frac{R^2}{z_1})} + i \, \Gamma / 2\pi \cdot \frac{(1 - d)}{\overline{z}_1} \, .$$

Выразив  $z_1$  и  $\overline{z}_1$  в полярной системе, получим

$$V_{1} = V_{\infty} \Big[ 1 - R^{2} / r^{2} \cdot \exp(i2\varphi) \Big] + i \Gamma / 2\pi r \cdot \Big[ (1 - d) \Big( r^{2} - R^{2} \Big) - r^{2} \Big] \exp(i\varphi) / \Big( r^{2} - R^{2} \Big).$$
(2)

Вихревая сила возникает, если вихрь движется относительно потока жидкости [4], поэтому сила, действующая на цилиндр, вызвана центральным и инверсионным вихрями. Следовательно, сила определяется по формуле Брайсона [5]  $F = -i\rho \Big[ \Gamma (V_{\infty} - 0) + \Gamma_i (V_f - Vv) \Big]$ , где интенсивность инверсионного вихря  $\Gamma_i$  равна  $-\Gamma$ , а скорость жидкости в точке инверсии  $V_f = V_1$ . Ограничимся рассмотрением силы и момента только для двух случаев значения d.

1. d = 0 – случай обтекания без дополнительной циркуляции, когда интенсивность центрального вихря равна интенсивности внешнего вихря. Тогда скорость основного вихря, полученная из (2), будет равна

$$V_1 = V_{\infty} \left[ 1 - R^2 / r^2 \cdot \exp(i2\varphi) \right] - i \Gamma / 2\pi r \cdot R^2 \exp(i\varphi) / \left( r^2 - R^2 \right).$$
(3)

Подставим выражения  $V_1$  и  $\overline{V_1}$  в формулу силы:  $F = -i\rho\Gamma V_{\infty} + i\rho\Gamma (V_1 + R^2/r^2 \cdot \exp(i2\varphi)\overline{V_1})$ . После упрощений формула принимает вид

$$F = -i\rho\Gamma V_{\infty} + i\rho\Gamma V_{\infty} \left(1 - R^4/r^4\right) + \rho\Gamma^2 R^2 \cdot \exp(i\varphi) / \left(2\pi r^3\right).$$

Составляющая  $i\rho\Gamma V_{\infty}(1-R^4/r^4)$  силы F, приложенная к точке инверсии, и образует крутящий момент  $M = \rho\Gamma V_{\infty}R^2(r^4 - R^4)\cos\varphi/r^5$ . После дальнейшего упрощения зависимость силы выражается следующей формулой:  $F = -i\rho\Gamma V_{\infty}R^4/r^4 + \rho\Gamma^2R^2\exp(i\varphi)/(2\pi r^3)$ . Максимальные значения силы достигаются, когда вихрь приближается к цилиндру, т.е. при  $r \to R$ .

2. *d* = 1– случай расчета обтекания без центрального вихря. При *d* =1 формула скорости (2) принимает вид

$$V_1 = V_{\infty} \left[ 1 - R^2 / r^2 \cdot \exp(i2\varphi) \right] - i \Gamma / 2\pi \cdot \left[ r \cdot \exp(i\varphi) / \left( r^2 - R^2 \right) \right].$$
(4)

Подставив выражения  $V_1$  и  $\overline{V_1}$  в формулу силы, получим

$$F = i\rho\Gamma V_{\infty} \left( 1 - R^4 / r^4 \right) + \rho\Gamma^2 \cdot \exp(i\phi) / (2\pi r) .$$

Как видим, составляющая силы, образующая крутящий момент *M*, такая же, что и в случае расчета с центральным вихрем.

Таким образом, в каждый фиксированный момент времени крутящий момент определяется формулой  $M = \rho \Gamma V_{\infty} R^2 (r^4 - R^4) \cos \varphi / r^5$  в зависимости от координат  $z_1 = r \exp(i\varphi)$  и интенсивности  $\Gamma$  основного вихря. Метод расчета изменения координат  $r, \varphi$  и интенсивности  $\Gamma$  по времени при заданной скорости  $V_{\infty}$  приведен в работе [6].

#### Вывод зависимости силы интегрированием давления

Вывод зависимости силы интегрированием давления на контуре в неустановившемся течении связан с громоздкими преобразованиями, поэтому при выводе формулы силы будем пропускать подробности некоторых промежуточных преобразований и приведем только их результаты. Давление  $p_{\theta}$  в точке  $z_{\theta} = R \cdot \exp(i \theta)$  контура выражается формулой  $p_{\theta} = p_{\infty} - \rho V_{\theta}^2 / 2 - \rho \partial \varphi_{\theta} / \partial t$ , где  $V_{\theta}$  и  $\partial \varphi_{\theta} / \partial t$  – скорость и производная действительной части комплексного потенциала скорости по времени в точке  $z_{\theta}$ . Определим скорость жидкости  $V_{\theta}$  и  $\partial \varphi_{\theta} / \partial t$ :

$$V_{\theta} = V_{\infty} \left( 1 - R^2 / \overline{z}_{\theta}^2 \right) + i \Gamma / \left( 2\pi (\overline{z}_{\theta} - \overline{z}_1) \right) - i \Gamma / \left( 2\pi (\overline{z}_{\theta} - R^2 / z_1) \right) + i \Gamma (1 - d) / \left( 2\pi \overline{z}_{\theta} \right) =$$
  
=  $i \cdot \exp(i\theta) \left[ -2V_{\infty} \sin\theta + \Gamma \left( 2R^2 - 2Rr\cos\psi - d \cdot c_{\psi} \right) / \left( 2\pi Rc_{\psi} \right) \right],$ 

где  $\psi = \theta - \phi$ ;  $c_{\psi} = R^2 + r^2 - 2Rr\cos\psi$ ;  $V_{\theta}^2/2 = \left[-2V_{\infty}\sin\theta + \Gamma\left(2R^2 - 2Rr\cos\psi - d \cdot c_{\psi}\right)/(2\pi Rc_{\psi})\right]^2$ .

При нахождении  $\partial \varphi_{\theta} / \partial t$  замечаем, что только координаты вихревой нити  $z_1$  зависят от времени, поэтому производная потенциала равна

$$\partial \varphi_{\theta} / \partial t = \operatorname{Re} \left[ \partial W_{\theta} / \partial t \right]_{t=0} = \operatorname{Re} \left[ i V_{1} \Gamma / \left( 2\pi \left( z_{\theta} - z_{1} \right) \right) + i \Gamma R^{2} \overline{V_{1}} / \left( 2\pi \overline{z_{1}}^{2} \left( z_{\theta} - R^{2} / \overline{z_{1}}^{2} \right) \right) \right],$$

где  $W_{\theta}$  получено заменой z на  $z_{\theta}$  в формуле (1). Тогда сила определяется интегралом

$$F = -\int_0^{2\pi} p_{\theta} \exp(i\theta) R d\theta \,.$$

Здесь также рассмотрим только два значения d.

1. d = 0.

Тогда скорость  $V_1$  определяется формулой (3), а зависимость  $V_{\theta}^2/2$  принимает вид  $V_{\theta}^2/2 = 2\left[-V_{\infty}\sin\theta + \Gamma(R-r\cos\psi)/(2\pi c_{\psi})\right]^2$ . Подставив выражения  $V_1$  и  $\overline{V_1}$  в формулу производной, получим  $\partial \phi_{\theta}/\partial t = -c_1/c_{\psi} + c_2\sin\psi/c_{\psi}$ , где  $c_1 = \Gamma^2 R^2/4\pi^2 r^2 + \Gamma V_{\infty}(r^4 - R^4)\sin\phi/2\pi r^3$ ,  $c_2 = \Gamma V_{\infty}R(r^2 - R^2)\cos\phi/\pi r^2$ .

В формуле силы определенный интеграл  $\rho R \int_0^{2\pi} 2V_\infty^2 \sin^2 \theta \exp(i\theta) d\theta$  равен нулю, а подынтегральные выражения оставшихся интегралов зависят от разности углов  $\psi = \theta - \phi$ , поэтому  $\sin \theta$  представим в виде  $\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \phi$ . Тогда формула силы принимает вид

$$F = \rho R \exp(i\varphi) \int_0^{2\pi} \left\{ a_1 \left[ \exp(i\varphi) \left( \sin \psi \cos \psi / c_{\psi} - i \cos^2 \psi / c_{\psi} \right) + i \cos \varphi / c_{\psi} \right] + a_2 \left[ i \cos \varphi \cos \psi \sin^2 \psi / c_{\psi} + \exp(i\varphi) \sin \psi \cos^2 \psi / c_{\psi} + i \sin \varphi \cos^3 \psi / c_{\psi} \right] + a_3 \left[ \cos \psi / c_{\psi}^2 + i \sin \psi / c_{\psi}^2 \right] + a_4 \left[ \cos^2 \psi / c_{\psi}^2 + i \cos \psi \sin \psi / c_{\psi}^2 \right] + a_5 \left[ \cos^3 \psi / c_{\psi}^2 + i \cos^2 \psi \sin \psi / c_{\psi}^2 \right] - c_1 \cos \psi / c_{\psi} - - i c_1 \sin \psi / c_{\psi} + c_2 \sin \psi \cos \psi / c_{\psi} + i c_2 \sin^2 \psi / c_{\psi} \right\} d\psi ,$$

где  $a_1 = -2V_{\infty}\Gamma R / \pi$ ,  $a_2 = 2V_{\infty}\Gamma r / \pi$ ,  $a_3 = \Gamma^2 R^2 / (2\pi^2)$ ,  $a_4 = -\Gamma^2 Rr / \pi^2$ ,  $a_5 = \Gamma^2 r^2 / (2\pi^2)$ .

Определенный интеграл с такими пределами от каждой из функций  $\sin\psi\cos\psi/c_{\psi}$ ,  $\sin\psi\cos^{2}\psi/c_{\psi}$ ,  $\sin\psi\cos^{2}\psi/c_{\psi}$ ,  $\sin\psi/c_{\psi}^{2}$ ,  $\sin\psi/c_{\psi}^{2}$ ,  $\sin\psi/c_{\psi}$  равен нулю. Интегралы от функций  $1/c_{\psi}$ ,  $\cos^{2}\psi/c_{\psi}$ ,  $\cos\psi/c_{\psi}$ ,  $\cos\psi/c_{\psi}$  и  $\cos^{3}\psi/c_{\psi}$  принимают значения  $2\pi/(r^{2}-R^{2})$ ,  $\pi(r^{2}+R^{2})/r^{2}\cdot 1/(r^{2}-R^{2})$ ,  $2\pi R/r \cdot 1/(r^{2}-R^{2})$  и  $\pi R/2r^{3}\cdot(R^{2}+3r^{2})/(r^{2}-R^{2})$ .

Определим значения некоторых интегралов:

$$I_{1} = \int_{0}^{2\pi} \left[ a_{1}/c_{\psi} + a_{2} \cos \psi/c_{\psi} \right] d\psi = 0 ,$$

$$I_{2} = \int_{0}^{2\pi} \left[ a_{1} \cos^{2} \psi/c_{\psi} + a_{2} \cos^{3} \psi/c_{\psi} \right] d\psi = V_{\infty} \Gamma R/r^{2} ,$$

$$I_{3} = \int_{0}^{2\pi} c_{1} \cos \psi/c_{\psi} d\psi = \Gamma^{2} R^{3} / (2\pi r^{3}) \cdot 1 / (r^{2} - R^{2}) + \Gamma V_{\infty} R \sin \phi/r^{2} + \Gamma V_{\infty} R^{3} \sin \phi/r^{4} ,$$

$$I_{4} = \int_{0}^{2\pi} \left[ a_{3} \cos \psi/c_{\psi} + a_{4} \cos^{2} \psi/c_{\psi}^{2} + a_{5} \cos^{3} \psi/c_{\psi}^{2} \right] d\psi = \Gamma^{2} R/2\pi r \cdot 1 / (r^{2} - R^{2}) ,$$

$$I_{5} = \int_{0}^{2\pi} c_{2} \sin^{2} \psi/c_{\psi} d\psi = \Gamma V_{\infty} R (r^{2} - R^{2}) \cos \phi/r^{4} .$$

Подставляя значения этих интегралов в формулу силы, получим

$$F = \rho R \exp(i\varphi) \cdot \left[i\cos\varphi I_1 - i\exp(i\varphi)I_2 - I_3 + I_4 + iI_5\right] = -i\rho\Gamma V_{\infty} R^4 / r^4 + \rho\Gamma^2 R^2 \exp(i\varphi) / (2\pi r^3)$$

Эта зависимость силы совпадает с формулой, выведенной импульсным методом. Однако вывод зависимости силы методом интегрирования давления связан с несравнимо большим объемом преобразований.

### 2. d = 1.

В этом случае скорость  $V_1$  определяется формулой (4), а формула половины квадрата скорости в точках контура принимает вид

$$V_{\theta}^{2}/2 = \left[2V_{\infty}\sin\theta + \Gamma/(2\pi R) + \left(r^{2} - R^{2}\right)/c_{\psi}\right]^{2}/2.$$

Производная потенциала определяется подстановкой значений  $V_1$ ,  $\overline{V_1}$  и равна

$$\partial \phi_{\theta} / \partial t = -c_1 \cdot 1 / c_{\psi} + c_2 \sin \psi / c_{\psi}$$
,

где  $c_1 = \Gamma^2 / (4\pi)^2 + \Gamma V_{\infty} (r^4 - R^4) \sin \varphi$ ,  $c_2 = \Gamma V_{\infty} R (r^2 - R^2) \cos \varphi / (\pi r^2)$ .

После исключения из подынтегрального выражения слагаемых, приводящих к нулевому значению определенного интеграла, формула силы принимает следующий вид:

$$F = \rho R \exp(i\varphi) \int_0^{2\pi} \left[ a_1 \left( \sin\varphi \cos^2 \psi + i \cos\varphi \sin^2 \psi \right) / c_{\psi} + a_2 \cos\psi / c_{\psi}^2 - c_1 \cos\psi / c_{\psi} + i c_2 \sin^2 \psi / c_{\psi} \right] d\psi,$$

где  $a_1 = V_{\infty} \Gamma(r^2 - R^2) / \pi R$ ,  $a_2 = \Gamma^2 (r^2 - R^2)^2 / (8\pi^2 R^2)$ . Учитывая значения ранее приведенных определенных интегралов, а также значение интеграла  $4\pi Rr / (r^2 - R^2)^3$  от функции  $\cos \psi / c_{\psi}^2$ , получим

$$F = \rho R \exp(i\varphi) \Big[ V_{\infty} \Gamma \Big( r^2 + R^2 \Big) \sin \varphi / \Big( Rr^2 \Big) + i V_{\infty} \Gamma \Big( r^2 - R^2 \Big) \cos \varphi / \Big( Rr^2 \Big) + r^2 / (2\pi r R) - \Gamma V_{\infty} \Big( r^2 + R^2 \Big) R \sin \varphi / r^4 + i \Gamma V_{\infty} R \Big( r^2 - R \Big) \cos \varphi / r^4 \Big].$$

После некоторых преобразований формула силы принимает вид, совпадающий с формулой импульсного метода

$$F = \rho \Gamma^2 \exp(i\varphi) / (2\pi r) + i\rho V_{\infty} \Gamma \left( 1 - R^4 / r^4 \right)$$

Здесь следует подчеркнуть, что получение аналитических зависимостей силы импульсным способом с учетом свойства скоростей жидкости внутри и вне кругового цилиндра значительно проще по сравнению с определением силы методом интегрирования давления.

### Расчет силы импульсным способом в случае распространения зависимости внешней скорости жидкости на внутренние точки круга

Скорость жидкости в центре круга невозможно определить по формуле внешней скорости  $V = V_{\infty} \left(1 - R^2/\overline{z}^2\right)$ , так как функция V не определена при z = 0, поэтому силу будем находить только для случая движения без центрального вихря. Тогда скорость движения основного вихря будет равна

$$V_1 = V_{\infty} \left( 1 - R^2 / \overline{z}_1^2 \right) - i\Gamma / \left( 2\pi \left( \overline{z}_1 - \overline{z}_i \right) \right) = V_{\infty} \left( 1 - R^2 \exp(i2\varphi) / r^2 \right) - ir\Gamma \exp(i\varphi) / 2\pi / \left( r^2 - R^2 \right),$$

инверсионного вихря

$$V_{\nu} = -R^2/r^2 \cdot \exp(i2\varphi) \cdot \overline{V_1} = V_{\infty} \left( \frac{R^4}{r^4} - R^2 \exp(i2\varphi)/r^2 \right) - i\Gamma \cdot R^2 \exp(i\varphi) \left/ \left( \frac{2\pi r \cdot (r^2 - R^2)}{r^2} \right) \right).$$

Скорость жидкости в точке инверсии определяется зависимостью

$$V_f = V_{\infty} \left( 1 - R^2 / \overline{z}_i^2 \right) + i\Gamma / \left( 2\pi \left( \overline{z}_i - \overline{z}_1 \right) \right) = V_{\infty} \left( 1 - r^2 \exp(i2\varphi) / R^2 \right) - -i\Gamma / 2\pi \cdot r \exp(i\varphi) / \left( r^2 - R^2 \right).$$

Следовательно, сила, действующая на цилиндр и приложенная к точке инверсии, будет определяться формулой

$$F = -i\rho\Gamma_i (V_f - V_v) = i\rho\Gamma V_{\infty} (1 - R^4/r^4 - (r^4 - R^4)\exp(i2\varphi)/(r^2R^2)) + \rho\Gamma^2 \exp(i\varphi)/(2\pi r).$$

Как видим, эта формула силы отличается от функции силы, полученной интегрированием давления по контуру и не зависящей от скорости жидкости внутри цилиндра. Откуда следует, что при определении силы распространением функции внешней скорости жидкости на внутренние точки круга приводит к ошибочному результату.

#### Основные выводы

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Если скорость жидкости внутри цилиндра от поступательного потока определять по формуле  $V = V_{\infty} (1 - z^2/R^2)$ , то скорости жидкости в вихревых точках внутри и вне кругового цилиндра, симметричных относительно окружности, оказываются равными. Следовательно, скорость жидкости в точке

инверсии будет равна скорости движения внешнего вихря.

2. В случае распространения формулы скорости внешних точек к внутренним точкам круга функции силы, полученные импульсным способом и интегрированием давления, не совпадают.

3. Изменение крутящего момента по времени определяется решением задачи поперечного обтекания внезапно приведенного в движение кругового цилиндра с образованием сосредоточенных вихрей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Крайко А.Н., Реент К.С.* Невязкая природа несимметрии отрывного обтекания симметричных тел // ПММ. 1999. Т. 63. Вып. 1. С. 63–70.
- 2. *Гумеров В.Г.* Скорость жидкости внутри кругового цилиндра, находящегося в плоскопараллельном потоке // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2017. № 2. С. 28–31.
- 3. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе И.В. Теоретическая гидромеханика. М.: ОГИЗ, 1948. Ч. 1. 535 с.
- 4. Сэффмэн Ф.Дж. Динамика вихрей. М.: Научный мир, 2000. 375 с.
- 5. *Bryson A.E.* Symmetric vortex separation on circular cylinders and cones // Journal of Applied Mechanics. 1959. Vol. 26. № 4. P. 643–648.
- 6. *Гумеров В.Г., Гумеров А.В.* Расчет обтекания тел вращения методом сосредоточенных вихрей // Изв. вузов. Авиационная техника. 2005. № 4. С. 28–32.

Поступила в редколлегию 2.08.18

# DETERMINATION OF A TORQUE ACTING ON A CIRCULAR CYLINDER SUDDENLY SET IN MOTION

### V.G. Gumerov

We consider the initial moments of the transverse flow around a circular cylinder suddenly set in motion after the separation of one of the first two vortices. The dependence of the force acting on the cylinder is obtained by integrating the pressure on the surface in a nonstationary flow. The same dependence of the force is obtained by a pulsed method that takes into account the uniformity of the liquid velocities in the center of the external vortex and the vortex at the inversion point inside the cylinder. Using the obtained formula of the force applied to the inversion point, the function of torque relative to the center of the cylinder is derived depending on the coordinates and intensity of the vortex as well as on the translational velocity.

Keywords: fluid velocity inside a circle, vortex velocity at the inversion point, pulse computational method, vertical start of the aircraft, wind gusts.

**Гумеров Василь Гумерович** – канд. техн. наук (СамГТУ, Самара) E-mail: Leila\_gumerova@list.ru

# ВЫЧИСЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ЗАКОНОВ ЗАДАНИЯ ПОСЛОЙНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАСТА ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

### Аль Джабри Адель Яхья Али, С.П. Плохотников, С.В. Никифорова, Р.К. Ахмад

Проведен сравнительный анализ численных решений осредненных двумерных моделей с модифицированными относительными проницаемостями жидкостей и лабораторными фазовыми проницаемостями, а также трехмерных моделей при неизотермической двухфазной фильтрации нефти в слоистых пластах. Рассмотрены различные вероятностные законы.

#### Ключевые слова: неизотермическая фильтрация, фазовые проницаемости, вычислительный эксперимент, осредненная модель.

При разработке слоистых нефтяных пластов для повышения нефтеотдачи традиционно применяют горячее заводнение. При этом численные гидродинамические расчеты реализуют с учетом изменения температуры пласта и окружающих пород. Используя опыт расчетов изотермической фильтрации, применяют известные осредненные модели [1–5] неизотермической фильтрации. Имеются среди них и модели с модифицированными проницаемостями фаз. Их называют осредненными. В них опираются на осредненные по толщине физические параметры пласта и жидкостей. В работах [1, 2] применяют среднюю по толщине пласта абсолютную проницаемость и исходные относительные лабораторные проницаемости фаз. При этом результаты расчетов по данной модели положительны лишь при малых значениях коэффициента вариации послойной неоднородности пласта по вертикали.

Другой метод базируется на схеме струйного течения и был предложен в работе [1] в условиях двухфазного изотермического течения только для частного линейного случая ЛПФ (лабораторные проницаемости фаз). Позднее в работах [3–5] он был обобщен на общий нелинейный случай. В этом методе используют среднюю по толщине пласта абсолютную проницаемость и МПФ (модифицированные проницаемости фаз). Численные расчеты показали хорошие результаты для различных величин коэффициента вариации – больших (максимальных) и малых при сравнении двумерных и трехмерных решений.

В данной работе изучается двухфазное неизотермическое течение в рамках модели Баклея – Леверетта [1–5]. Рассматривается площадное заводнение в слоистом пласте, где осуществляется закачка горячей или холодной воды. Изучается полосообразный пласт, который разрабатывается тремя скважинами. Центральная – нагнетательная (горячая или холодная вода) и две симметричные от нее слева и справа – эксплуатационные, добывающие нефть и воду из разрабатываемого пласта на основе перепада давлений. При этом для вычислений применяется трехмерная математическая модель и две известные двумерные модели [3–5]. Абсолютная проницаемость по слоям задана вероятностным распределением: использован равномерный и экспоненциальный законы. Осуществлен сравнительный анализ двумерных и трехмерных решений для каждого из этих законов. Вычислены погрешности отклонения для некоторых основных показателей разработки пласта, рассмотрены различные функции ЛПФ. Проведен их сравнительный анализ между собой, а также для каждого из двух законов. Сделаны определенные выводы, и на их основе даны рекомендации по практическому применению указанных осредненных моделей.

Цель данной работы – изучить погрешность каждой осредненной двумерной модели по сравнению с эталонными трехмерными решениями с помощью широкого вычислительного эксперимента. Для этого необходимо провести численные расчеты по двум осредненным двумерным моделям и трехмерной модели, затем осуществить сравнительный анализ и оценку погрешности каждой из двух осредненных моделей с помощью сравнения трехмерных и двумерных решений при неизотермическом течении, рассмотреть случаи горячего и холодного заводнений. При этом численные решения трехмерных моделей принимаем за эталонные. По слоям абсолютная проницаемость пласта задается дискретно рядом, подчиняющимся равномерному или экспоненциальному законам. Также проводится сравнительный анализ решений для каждого закона распределения при трех фиксированных видах функций лабораторных проницаемостей фаз: линейных, квадратичных, кубических.

#### Описание математических моделей

Изучается двухфазное неизотермическое течение нефти и воды в пористой среде в рамках модели Баклея – Леверетта при площадном заводнении в полосообразном слоистом пласте: одна нагнетательная скважина в центре прямоугольника, а на противоположных краях – две добывающие скважины симметрично. В работе [5] схематично даны расчетные блоки слоистого пласта в двумерной и трехмерной постановках при пяти точечной системе заводнения. Аналогичные расчетные блоки используются в данной работе для полосообразного пласта.

В работах [3–5] даны математические формулы МПФ модели B двухфазной неизотермической фильтрации. Они используют поправочные коэффициенты, полученные при допущении струйности течения. Там же даны формулы простейшей модели C, широко применяющиеся в практических расчетах.

В данной работе с помощью вычислительных экспериментов изучается величина погрешности каждой осредненной модели относительно эталонных трехмерных решений:  $A_7$ ,  $A_8$ . Рассмотрены варианты, когда в пласт закачана горячая или холодная вода для двух вероятностных законов распределения абсолютной проницаемости по толщине пласта – равномерного и экспоненциального. В работе приведены кривые только этих двух граничных эталонов, но расчеты проводились для восьми эталонов, характерных для слоистых пластов, подробно описанных в работах [3–5].

Трехмерная (*x*, *y*, *z*)-задача двухфазовой неизотермической фильтрации, краевые условия которой известны, дается в работах [1, 2, 5].

Расчеты проведены для восьми трехмерных моделей и двух осредненных двухмерных моделей. Полученные графики задают кривые для двух видов решений  $A_7$ ,  $A_8$  трехмерной модели. Они определяют для рассмотренного показателя разработки границы сверху и снизу, при этом даются решения для обеих осредненных моделей.

Использованы следующие трехмерные (*x*, *y*, *z*)-модели.

1. Модель, в которой слои изолированные ( $A_8$ -модель) – это эталонное решение задачи для десятислойного пласта с изолированными слоями (отсутствуют вертикальные потоки жидкостей) и абсолютной проницаемостью, подчиненной равномерному закону. Были изучены десять слоев (где высоты  $H_1 = H_2 = H_3 = H_4 \dots H_{10} = 1$  м), которые изолированы друг от друга непроницаемыми глиняными перемычками.

2. Модель с неизолированными слоями (*A*<sub>7</sub>-модель) – это та же модель, но с неизолированными слоями. Изучали десять слоев. Все они гидродинамически связанные, размещены снизу – вверх: лучший (максимальная абсолютная проницаемость) рядом с худшим (минимальная проницаемость), далее лучший из оставшихся слоев рядом с худшим из них и т.д.

В табл. 1 представлено дискретное распределение проницаемости по слоям для этих эталонов для обоих законов, где  $K_1, K_2, ..., K_{10}$  – проницаемость слоев, измеряемая в дарси – единице проницаемости пористых сред (1 Д приблизительно равен 1,02·10<sup>-12</sup> м<sup>2</sup>) и широко используемая в этих единицах при расчетах в подземной гидродинамике.

Таблица 1

Распределение проницаемости по слоям для трехмерной модели

391/011				П	роницае	мости сл	юев			
Jakon	$K_1$	$K_2$	<i>K</i> <sub>3</sub>	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$	<i>K</i> <sub>10</sub>
Экспоненциальный	300	400	216	527	144	697	82	958	26	1651
Равномерный	450	550	350	650	250	750	150	850	50	950

Функции ЛПФ  $K_{\rm B}(S)$ ,  $K_{\rm H}(S)$  заданы нелинейными параболического вида

$$K_{\rm B}(S) = K_{\rm B_0} \cdot (S_n(S))^{\rm u},$$
  

$$K_{\rm H}(S) = K_{\rm H_0} \cdot (1 - S_n(S))^{\beta}, \ (\alpha, \beta > 1),$$
  

$$S_{\rm II}(S) = (\tilde{S} - S_*) / (S^* - S_*).$$
(1)

МПФ экспоненциального закона выглядят следующим образом

$$K_{\rm B}^{\rm M}(\tilde{S}) = K_{\rm B}(\tilde{S}) \cdot \left[1 - \ln S_{\rm m}(\tilde{S})\right],$$

$$K_{\rm H}^{\rm M}(\tilde{S}) = K_{\rm H}(\tilde{S}) \cdot \left[1 + \frac{S_{\rm m}(\tilde{S})}{1 - S_{\rm m}(\tilde{S})} \cdot \ln S_{\rm m}(\tilde{S})\right],$$

$$S_{\rm m}(S) = \left(\tilde{S} - S_{*}\right) / \left(S^{*} - S_{*}\right).$$
(2)

 $M\Pi\Phi$  равномерного закона используем в виде

$$K_{\rm B}^{\rm M}(\tilde{S}) = K_{\rm B}(\tilde{S}) \cdot \left[1 + V \cdot \sqrt{3} \cdot \left(1 - S_{\rm II}(\tilde{S})\right)\right],$$
  

$$K_{\rm H}^{\rm M}(\tilde{S}) = K_{\rm H}(\tilde{S}) \cdot \left[1 - V \cdot \sqrt{3} \cdot S_{\rm II}(\tilde{S})\right],$$
  

$$S_{\rm II}(S) = \left(\tilde{S} - S_{*}\right) / \left(S^{*} - S_{*}\right).$$
(3)

Также были использованы следующие осредненные двумерные (*x*, *y*)-модели.

1) *С*-модель, в которой задача решалась с линейными, квадратичными, кубическими ЛПФ вида (1), средней  $K^* = 0,5$  дарси в двумерной постановке. Был рассмотрен по вертикали один слой, где высота H = 10 м.

2) *В*-модель, в которой задача решалась с МПФ вида (2), средней  $K^* = 0$ , 5 дарси для равномерного и экспоненциального законов распределения для абсолютной проницаемости K(z). Был задан один слой, где высота H = 10 м.

#### Результаты численного эксперимента

В проведенных расчетах использованы следующие параметры разностной сетки для моделей.

1. Трехмерные (x, y, z)-модели при экспоненциальном и равномерном законах, где абсолютная проницаемость определена по слоям (см. табл. 1). В конечно-разностной схеме применена сетка из бло-ков размерностью  $11 \times 5 \times 10$ .

2. Двумерные осредненные модели, где применяется средняя по толщине абсолютная проницаемость. При этом в случае ЛПФ используется модель C, а в случае МПФ – модель B. В этих моделях разностная схема имеет сетку размерностью  $11 \times 5 \times 1$ .

Результаты вычислительного эксперимента получены при следующих температурных режимах: для закачки в пласт горячей воды – 100 °C; холодной воды – 22 °C; начальная температура пласта – 30 °C.

Значения заданных физических параметров: 12,97 мПа – начальное давление в пласте; 30 °С – начальная температура в пласте; 100 °С (или 22 °С) – температура закачиваемой воды; 1230 м – глубина расположения пласта; 5,07 мПа – давление насыщения; 1000 кг/м<sup>3</sup> – плотность для воды; 850 кг/м<sup>3</sup> – плотность для нефти; 5,57 мПа – забойное давление для добывающей скважины; 17,23 мПа – забойное давление для нагнетательной скважины.

Пласты имели следующие физические параметры:

 $K_{\rm B0} = 0,5$  – наибольшая ЛФП воды;  $K_{\rm H0} = 0,7$  – наибольшая ЛПФ нефти;  $S^* = 0,8$  – наибольшая насыщенность воды на нагнетательной скважине;  $S^* = 0,3$  – наименьшая остаточная насыщенность воды; S – насыщенность воды,  $S_* \le S \le S^*$ ;  $\mu_{\rm H} = 15,1$  МПа – начальная вязкость нефти при начальной температуре;  $\mu_{\rm B} = 0,77$  МПа – начальная вязкость воды; m = 0,2 – пористость. Кроме того, для изучаемых пластов взяты следующие физические параметры: H = 10 м,  $H_j = 1$  ( $j = \overline{1,10}$ ), L = 300 м,  $K^* = 0.5$  мкм<sup>2</sup>,  $\mu_B (30 \text{ °C}) = 0.77$  мПа с,  $\mu_H (30 \text{ °C}) = 15.1$  мПа с, m = 0.3,  $S^* = 0.8$ ;  $S_* = 0.3$ ,  $\lambda_B = 418680$  BT/(м·K),  $\lambda_H = 314010$  BT/(м·K),  $c_B = 4186.8$  Дж/(кг·K),  $c_H = 3140$  Дж/(кг·K),  $c_{\Pi} = 2721.42$  Дж/(кг·K),  $\lambda_{\Pi} = 272142$  BT/(м·K),  $c_0 = 2721.42$  Дж/(кг·K),  $\lambda_0 = 209340$  BT/(м·K),  $T_{\Pi} = T_0 = 30$  °C.

Вязкости фаз таковы [2]:  $\mu_{\rm H}(T) = 151/(T-20)$ ,  $\mu_{\rm B}(T) = 35/(T+15,7)$ .

В табл. 2 приведены их значения.

	-	• •	
<i>T</i> , °C	$\mu_{\scriptscriptstyle \rm H}, M\Pi a \cdot c$	$\mu_{\scriptscriptstyle B}, M\Pi a \cdot c$	$\mu_{\rm H}/\mu_{\rm B}$
21	151	0,96	157,3
22	75,5	0,93	81,2
25	30,2	0,86	35,1
30	15,1	0,77	19,6
60	3,8	0,46	8,3
100	1,9	0,30	6,3
150	1,2	0,21	5,7
200	1,84	0,16	5,3

Значения физических параметров

Таблииа 2

На рис. 1 приведены графики зависимости коэффициента нефтеотдачи от времени разработки для кубических ЛФП (1) при экспоненциальном (*a*) и равномерном (*б*) законах для горячего заводнения.



Графики, соответствующие эталонным решениям, при горячем заводнении образуют множество, в котором имеются граничные значения: это эталонные решения  $A_8$  (ограничение снизу) и решения  $A_7$  (ограничение сверху). Двумерные решения формируют вилку, в которую вписываются множества эталонов. В то же время кривая модели *С* является верхним ограничением и завышает значения эталонов. Кривая модели *В* практически повсюду – ограничение снизу.

Для горячего заводнения (см. рис 1) отметим закономерности: итоговое значение коэффициента нефтеотдачи при отключении обеих работающих эксплуатационных скважин при достижении 98 % обводненности равно в среднем по вилке разброса эталонов для экспоненциального закона 40 %, а его значение по вилке осредненных моделей – 41 %; для равномерного закона имеем 39 и 40 %. Как видим, эталонные вилки и вилки осредненных моделей для первого закона являются более широкими по сравнению со вторым. Такая разница определена существенным различием значений коэффициента вариации послойной неоднородности для этих двух законов, равного 0,94 и 0,57.

На рис. 2 приведены соответствующие графики зависимости коэффициента нефтеотдачи от времени разработки кубических ЛФП (1) при экспоненциальном (*a*) и равномерном ( $\delta$ ) законах для для холодного заводнения.



Для холодного заводнения (см. рис. 2) имеют место аналогичные результаты, но теперь закачивается холодная вода с температурой 22 °C, а начальная температура пласта – 30 °C. В итоге получили, что коэффициент нефтеотдачи в момент отключения обеих работающих эксплуатационных скважин при 98 % обводненности равен в среднем по вилке эталонов при экспоненциальном законе (32 %), а по вилке осредненных моделей – 33 %, для равномерного закона 35 и 36 %.

Отметим, что на всех графиках (рис. 1, 2) получены аналогичные результаты. По сравнению с горячим заводнением имеем существенное уменьшение значений коэффициента нефтеотдачи при обоих законах. При этом по-прежнему эталонные вилки и вилки осредненных моделей для первого закона получились более широкими по сравнению со вторым законом. При горячем заводнении для обоих законов разница в значениях коэффициента итоговой нефтеотдачи незначительна, а при холодном заводнении имеется значительное различие.

#### Результаты исследования

Итак, приведем итоговые выводы и практические рекомендации. Каждую осредненную модель отдельно и в совокупности с другой можно рекомендовать для приближенных гидродинамических расчетов слоистых пластов в условиях неизотермического двухфазного течения. Эти модели применимы для проведения сравнительного анализа течения при различных вероятностных законах, определяющих функцию абсолютной проницаемости по толщине пласта, при горячем или холодном заводнениях. Они применимы и для расчетов изотермического вытеснения для обоих приведенных в работе вероятностных законов. Полученные вилки ограничений двух осредненных моделей можно рекомендовать для решения практических геологических разведывательных задач. Они часто возникают при определении конкретного вероятностного закона, определяющего послойную неоднородность слоистых пластов по вертикале, и его параметров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Булыгин Д.В., Булыгин В.Я. Геология и имитация разработки залежей нефти. М.: Недра, 1996. 382 с.
- 2. Методические указания по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений. М.: ВНИИОЭНГ, 2003. Ч. 2. Фильтрационные модели. 228 с.
- 3. *Bogomolov V.A. et al.* Mathematical simulation of three-phase filtration in stratified beds with account for the scheme of jets Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2011. Vol. 84. № 5. P. 975–979.
- 4. Плохотников С.П., Елисеенков В.В. Гидродинамические расчеты в слоистых пластах на основе модифицированных относительных проницаемостей // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 5. С. 115–121.
- 5. Плохотников С.П. и др. Осреднение моделей трехфазной фильтрации в неоднородных слоях, подчиняющихся равномерному распределению // Вестник КНИТУ. 2012. № 4. С. 99–102.

Поступила в редколлегию 23.01.19

# COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO-DIMENSIONAL AND THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SOLUTIONS FOR TWO PROBABILISTIC LAWS OF TWO-PHASE NON-ISOTHERMAL FILTRATION IN LAYERED RESERVOIR

# Y. ALGabri, S.P. Plokhotnikov, S.V. Nikiforova, and R.K. Ahmad

The comparative analysis of averaged two-dimensional models with modified relative phase permeability and laboratory phase permeability was done. Three-dimensional models are also analyzed at not isothermal two-phase filtration of oil in stratified beds. Various probabilistic laws are considered.

Keywords: non-isothermal filtration, phase permeability, computational experiment, averaged model.

Аль Джабри Адель Яхья Али – аспирант (КНИТУ, Казань) E-mail: aljabriadel2018@gmail.com

**Плохотников Сергей Павлович** – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: plokhotnikov@kstu.ru

**Никифорова Светлана Витальевна** – канд. физ.-мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: svetlana1605@yandex.ru

Ахмад Рами Камал – аспирант (КНИТУ, Казань) E-mail: almazgnap@yandex.ru

# РЕШЕНИЕ ОДНОЙ ЗАДАЧИ УСРЕДНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ И ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

## Р.К. Ахмад, С.П. Плохотников, С.В. Никифорова, Аль Джабри Адель Яхья Али

Рассматриваются вопросы усреднения физических параметров, которые являются коэффициентами исходной системы дифференциальных уравнений эллиптического и параболического типов, на примере построения осредненных моделей для решения задачи двухфазной неизотермической фильтрации.

Ключевые слова: эллиптические и параболические уравнения, двухфазная неизотермическая фильтрация, усредненные параметры, коэффициенты системы дифференциальных уравнений.

Решение задачи усреднения физических параметров, являющихся коэффициентами исходной математической задачи в виде системы дифференциальных уравнений эллиптического и параболического типов, представим на примере построения некоторых осредненных моделей для случая решения известной системы из трех уравнений для задачи двухфазной неизотермической фильтрации. В ней рассматривают систему, которая состоит из одного эллиптического и двух параболических уравнений при известных краевых условиях. В этой системе усреднение ее нелинейных коэффициентов осуществляется тремя различными способами. В задачах механики сплошных сред осредненные модели традиционно применяют для проведения численных расчетов в различных областях, в том числе и на различных этапах разработки нефтяных и газовых месторождений. Их так же часто используют и для решения задач оптимальной разработки [1–5].

#### Двумерная задача двухфазного вытеснения нефти водой

Рассматриваем профильную двумерную (x, z)-задачу двухфазного вытеснения нефти водой в слоистом по абсолютной проницаемости прямоугольном пласте между двумя галереями при заданном перепаде давлений. Допускаем, что жидкости несжимаемы, отсутствуют капиллярные и гравитационные силы, течение определено математической моделью Баклея – Леверетта [1–4].

Эта задача неизотермической фильтрации имеет математическую постановку вида [1, 4]

$$\operatorname{div}[K_{\Sigma}\operatorname{grad} P] = 0; \tag{1}$$

$$\operatorname{div}[FK_{\Sigma}\operatorname{grad} P] = m \cdot \frac{\partial S}{\partial t};$$
(2)

$$\operatorname{div}[\lambda \operatorname{grad} T] + \vec{v} \operatorname{grad} T - \frac{1}{H} \cdot Q(t) = c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$
(3)

при стандартных обозначениях:

$$K_{\Sigma} = K(z) \left[ \frac{K_{B}(S)}{\mu_{B}(T)} + \frac{K_{H}(S)}{\mu_{H}(T)} \right], \quad F = \frac{K(z)K_{B}(S)}{\mu_{B}(T)K_{\Sigma}}, \quad \overline{\text{grad}P} = \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \overline{i} + \frac{\partial P}{\partial z} \cdot \overline{k}$$
$$\overline{\text{grad}T} = \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \overline{i} + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \overline{k}, \quad \overline{v} = K(z) \cdot \left[ \frac{c_{B} \cdot K_{B}(S)}{\mu_{B}(T)} + \frac{c_{H} \cdot K_{H}(S)}{\mu_{H}(T)} \right] \cdot \overline{\text{grad}P},$$
$$Q(t) = -\lambda_{0^{-}} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} - \lambda_{0^{+}} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H}.$$

Здесь известные начальные и граничные условия для давления P, насыщенности воды S и температуры T задаются уравнениями вида

$$P\big|_{x=0} = P_1, \ P\big|_{x=L} = P_2, \ S\big|_{x=0}^{t>0} = S_{\max} = S^*, \ S\big|_{t=0} = S_{\min} = S_*, \ T\big|_{t=0} = T^0, \ T\big|_{x=0}^{t>0} = T_B, \ \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=L} = 0.$$

Задачу решаем при условиях сопряжения, записанных для давления, температуры и вертикальных потоков фаз на границах слоев, из которых состоит слоистый пласт. Они имеют следующий вид:

$$P^{+} = P^{-}, \ T^{+} = T^{-}, \ \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right)^{+} = \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right)^{-}, \ T_{o^{-}} = T\big|_{z=0}, \ T_{o^{+}} = T\big|_{z=H},$$
$$\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right)_{o^{-}} = \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right)\big|_{z=0}, \ \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right)_{o^{+}} = \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right)\big|_{z=H}, \ v_{\mathrm{B},z}^{+} = v_{\mathrm{B},z}^{-}, \ v_{\mathrm{H},z}^{+} = v_{\mathrm{H},z}^{-},$$

а также учитываются условия непроницаемости подошвы и кровли пласта  $\frac{\partial P}{\partial z}\Big|_{z=0,H} = 0$ . В окружающих

пласт областях  $O^+ \cup O^-$  изменение температуры учитывается при условии пренебрежения горизонтальной теплопроводностью известным уравнением вида [1, 2]

$$\lambda_0 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = c_0 \frac{\partial T}{\partial t}.$$
(4)

При его решении рассматриваем среду на 150 м вверх и вниз относительно пласта, полагая, что возмущение поля температуры реально значительно меньше. При этом применяем стандартные обозначения, где функция K(z) – абсолютная проницаемость пласта (состоящего из гидродинамически связанных, однородных по горизонтали слоев с разными абсолютными проницаемостями), определенная конкретным вероятностным законом с плотностью f(k) для изучаемого пласта и заданная кусочно-постоянной по вертикали, и в системе уравнений (1) - (3) K(z) является коэффициентом. Функции  $K_{\rm B}(S)$  и  $K_{\rm H}(S)$  – относительные проницаемости воды и нефти, определяемые в лаборатории по кернам. Функции  $\mu_{\rm B}(T)$  и  $\mu_{\rm H}(T)$  – вязкости фаз, зависящие от температуры; H – толщина пласта; L – расстояние между галереями; m – пористость;  $S^*$  – максимальная насыщенность воды на нагнетающей воду галерее;  $S_*$  – минимальная остаточная насыщенность воды; Q(t) – потери тепла в окружающие породы,  $\lambda_{\rm n}$ ,  $\lambda_{\rm o}$ ,  $\lambda_{\rm B}$ ,  $\lambda_{\rm H}$  – теплопроводности;  $c_{\rm n}$ ,  $c_{\rm o}$ ,  $c_{\rm B}$ ,  $c_{\rm H}$  – теплоемкости пласта, окружающих пород, воды и нефти соответственно [1,4], определяемые по формулам  $\lambda = m[\lambda_{\rm B}S + (1-S)\lambda_{\rm H}] + (1-m)\lambda_{\rm n}$ ,  $c = m[c_{\rm B}S + (1-S)c_{\rm H}] +$ 

 $+(1-m)c_{\Pi}; v_{B,z} = -K(z)\frac{K_{B}(S)}{\mu_{B}(T)}\frac{\partial P}{\partial z}, v_{H,z} = -K(z)\frac{K_{H}(S)}{\mu_{H}(T)}\frac{\partial P}{\partial z}$  – закон Дарси для каждой фазы вдоль оси *OZ*.

Здесь знаком «плюс» в условиях сопряжения обозначено направление, идущее сверху вниз по оси *OZ*, а знаком «минус» – направление, идущее снизу вверх.

Изучаем слоистый пласт, имеющий пять однородных по абсолютной проницаемости слоев одинаковой толщины  $H_j = H/5$ , где известна проницаемость каждого –  $K_j$ . Изучали лишь один случай взаимного расположения гидродинамически связанных между собой слоев пласта – эталон A.

#### Новые осредненные модели

Данные лабораторных исследований определяют, что функции ОФП (относительные фазовые проницаемости)  $K_{\rm B}(S)$  и  $K_{\rm H}(S)$ , являющиеся коэффициентами системы (1) – (3), в общем случае функции нелинейные. Их задают известными в теории фильтрации квадратичными или кубическими параболами вида [1–6]  $K_{\rm B}(S) = K_{\rm B_0} \cdot (S_{\rm II}(S))^{\alpha}$ ,  $K_{\rm H}(S) = K_{\rm H_0} \cdot (1 - S_{\rm II}(S))^{\beta}$ ,  $S_{\rm II}(S) = (S - S_*)/(S^* - S_*)$  при  $K_{\rm H}(S) = 2$ , 3 и  $K_{\rm B}(S) = 2$ , 3. На практике вместо исходной двумерной (или трехмерной) задачи в силу недостатка геологической информации часто решают задачу в одномерной (или двумерной) постановке, в которой используют осредненные тем или иным способом физические параметры пласта и его коэффициенты для системы уравнений – абсолютную проницаемость и ОФП.

При моделировании двухфазной неизотермической фильтрации в слоистых пластах в работах [4–7] получены обобщенные МФП (модифицированные фазовые проницаемости)  $\overline{K}_{\rm B}$  и A(S). Там же с помо-

щью вычислительного эксперимента исследовалась величина погрешности осредненной модели, использующей эти проницаемости. Для двухфазной фильтрации имеем следующие формулы:

$$K_{\scriptscriptstyle B}^{\scriptscriptstyle M}(S) = K_{\scriptscriptstyle B}(S) \cdot A(S), \quad K_{\scriptscriptstyle H}^{\scriptscriptstyle M}(S) = K_{\scriptscriptstyle H}(S) \cdot B(S), \tag{5}$$

где  $K_{\rm B}(S)$  и  $K_{\rm H}(S)$  – ОФП, заданные в качестве коэффициентов системы уравнений (1) – (3). При этом впервые вводится новое понятие «поправочные коэффициенты»:  $A(S) = \frac{\overline{K}_{\rm B}}{K^*}$  и  $B(S) = \frac{\overline{K}_{\rm H}}{K^*}$  вычисляются на основе допущения о струйном характере течения по слоям в пласте для частного случая линейных функций ОФП  $K_{\rm B}(S)$  и  $K_{\rm H}(S)$ , которые определяются по формулам

$$\overline{K}_{\mathrm{B}} = \frac{\int\limits_{\overline{k}}^{b} kf(k)dk}{\int\limits_{\overline{k}}^{b} f(k)dk}, \quad \overline{K}_{\mathrm{H}} = \frac{\int\limits_{a}^{k} kf(k)dk}{\int\limits_{a}^{b} f(k)dk}, \quad K^{*} = \int\limits_{a}^{b} kf(k)dk, \quad A(S) = \frac{\overline{K}_{\mathrm{B}}}{K^{*}}, \quad B(S) = \frac{\overline{K}_{\mathrm{H}}}{K^{*}},$$

где *b* и  $S_n$  – значения средних абсолютных проницаемостей в зонах воды и нефти для каждого вертикального сечения пласта;  $S^*$  – средняя абсолютная проницаемость по вертикальному сечению. Традиционно в конкретных расчетах вместо этих формул применяются их дискретные аналоги. Величина *S* вычисляется по известному значению  $S_*$  из численного решения уравнения

$$1 - S_{\Pi}(S) = \int_{a}^{\overline{k}} f(k) dk, \ S_{\Pi}(S) = (S - S_{*}) / (S^{*} - S_{*}).$$

Здесь функция  $K_{\rm B}^{\rm M}(S)$  – это плотность вероятностного распределения абсолютной проницаемости  $K_{\rm H}^{\rm M}(S)$ , изменяющейся в усеченных границах от *a* до *b*;  $K_{\rm B}(S)$  – это «подвижная вода»;  $S^*$  – максимальное значение (насыщенность воды на нагнетательной галерее);  $S_*$  – минимальное. Численные гидродинамические расчеты с этими  $\overline{K}_{\rm B}$  и A(S) на одномерных осредненных задачах показали удовлетворительное приближение к решениям эталонной двумерной задачи. Этот вопрос верификации упрощенной осредненной модели был решен в работах [4–7].

Теперь рассмотрим слоистые пласты с более сложным набором исходных лабораторных функций ОФП  $K_{\rm B}(S)$  и  $K_{\rm H}(S)$ . Известно из научной литературы [1–3], что для различных слоев часто используют различные аналитические функции ОФП. При этом возникает задача построения единых МФП для всего пласта в осредненной модели. В данной работе предлагаются математические методы построения единых для всего пласта МФП  $\overline{K}_{\rm B}$  и A(S) и их последующего применения в осредненных моделях. В работах [1, 2] даются практические рекомендации для задания лабораторных функций ОФП фаз по слоям реальных слоистых пластов.

Рассмотрим пласт, где ОФП записаны в общем виде следующим образом:

$$K_{\rm B}(S) = K_{\rm B_0} \cdot \left[S_{\rm II}(S)\right]^{\alpha_i}, \ K_{\rm H}(S) = K_{\rm H_0} \cdot \left[1 - S_{\rm II}(S)\right]^{\beta_i}, \tag{6}$$

где показатели степеней – константы  $K_{\rm B}(S)$ , i – зависят от номера  $K_{\rm B}^{\rm M}(S)$  слоя  $K_{\rm B}(S)$  и могут различаться по слоям. Определим для такого пласта единую МФП для воды переходом к единому фиктивному слоистому пласту с единой ОФП воды для всех его слоев. Эта величина имеет вид

$$K_{\rm B}^{*}(S) = K_{\rm B_{0}} \cdot [S_{\rm II}(S)]^{\alpha^{*}}, \ \alpha^{*} = \max \ \alpha_{i}.$$
 (7)

Реализация этого практически допустима на основании следующих рассуждений. Известно, что на график функции МФП воды всегда завышает график исходной лабораторной ОФП  $[S_n(S)]^{\alpha^*} \cdot A^*(S)$  при

допущении струйности течения [4–7]. Тогда можно каждый фиксированный однородный слой исходного слоистого пласта при  $K_{\rm H}^{\rm M}(S)$  заменить на «фиктивный слоистый» слой, имеющий определенным набор различных по абсолютной проницаемости слоев. Все они имеют единую *i* вида (7) и среднюю абсолютную проницаемость, равную величине абсолютной проницаемости этого  $[1 - S_{\rm n}(S)]^{\beta^*} \cdot B^*(S)$ -го слоя. Для этого фиктивного слоистого слоя можно записать соответствующую ему МФП  $\beta^* = \min \beta_i$  вида (5), которая должна совпадать с исходной  $A^*(S), B^*(S)$  (6) для этого  $K_{\rm B}^{\rm M}(S)$ -го слоя.

Аналогичные рассуждения для нефтяной фазы приводят к другому фиктивному слою с единой ОФП нефти  $K_{\rm H}^{\rm M}(S)$ , в результате чего созданы единые для всего слоистого пласта МФП вида

$$K_{\rm B}^{\rm M}(S) = K_{\rm B_0} \cdot \left[S_{\rm II}(S)\right]^{\alpha^*} \cdot A^*(S), \quad K_{\rm H}^{\rm M}(S) = K_{\rm H_0} \cdot \left[1 - S_{\rm II}(S)\right]^{\beta^*} \cdot B^*(S), \tag{8}$$

где  $\alpha = \alpha^*$  коэффициенты  $A^*(S)$  и  $B^*(S)$  определены на основе допущения о струйности течения отдельно в первом и отдельно во втором из полученных фиктивных слоистых пластов. Однако в итоге они берутся едиными для всего исходного слоистого пласта.

Рассмотрим теперь вопрос о возможности физически и математически осуществить предложенное построение функций МФП  $\overline{K}_{B}$  и A(S) по формулам (7) – (8). Известно, что величина  $K_{B}^{M}(S)$  равна среднему значению абсолютной проницаемости в наиболее проницаемых слоях, но средняя в безразмерном виде задана  $K_{B0}$ . Тогда необходимо выполнение неравенства  $\overline{K}_{B}/K^{*} \ge 1$ , которое должно сохраняться при построении МФП  $\overline{K}_{B}$ . Формулы (5) определяют  $K_{B}^{M}(S) = K_{B}(S)\overline{K}_{B}/K^{*}$ . Если рассмотреть слой, где степень  $\alpha_{i} = \beta < \alpha$  при  $\alpha = \alpha^{*}$ , тогда для  $K_{B}(S) = K_{B0} \cdot [S_{\Pi}(S)]^{\alpha}$  и запишем  $K_{B}^{M}(S) = K_{B0} \cdot [S_{\Pi}(S)]^{\beta}$ ,  $0 \le \overline{K}_{H}/K^{*} \le 1$ . Отсюда  $K_{B0} \cdot [S_{\Pi}(S)]^{\alpha} \cdot \overline{K}_{B}/K^{*} = K_{B0} \cdot [S_{\Pi}(S)]^{\beta}$  или  $\overline{K}_{B}/K^{*} = [S_{\Pi}(S)]^{\beta-\alpha}$ , но поскольку  $[S_{\Pi}(S)] \le 1$  и  $\alpha - \beta > 0$ . Имеем при  $\alpha > \beta$  неравенство  $1 - \frac{S_{i} - S^{*}}{S^{*} - S_{*}} = \sum_{KN \le K_{i}} P(K_{N})$ , что и требовалось доказывается и второе

неравенство вида  $J(S_i) = \sum_{K_N \le K_i} K_N \cdot P(K_N)$ ).

Как правило, при гидродинамических расчетах в слоистых пластах имеем в наличии по данным геологии дискретный ряд распределения  $K_i$ ,  $H_i$  по слоям. Если задано непрерывное распределение, тогда математически определяем такой ряд, где  $K_i$  – абсолютная проницаемость,  $H_i$  – толщина каждого слоя,  $P(K_i) = H_i/H$  – его вероятность. При решении задачи по замене конкретного однородного слоя с абсолютной проницаемостью  $K_i$  и толщиной  $H_i$  на фиктивный слоистый слой возникает необходимость решать систему уравнений для фазы нефти в дискретном виде [4–7]

$$1 - \frac{S_i - S^*}{S^* - S_*} = \sum_{K_N \le K_i} P(K_N), \quad \frac{K_{\rm H}(S_i)}{1 - S_{\rm II}(S_i)} \cdot \frac{J(S_i)}{K_l} = K_{\rm H}^*(S_i), \quad J(S_i) = \sum_{K_N \le K_i} K_N \cdot P(K_N). \tag{9}$$

Эта система при заданном фиксированном числе слоев для этого фиктивного слоистого слоя имеет множество решений, но при допущении условия вида  $H_1 = H_2 = ... = H_j = H/j$ , где j – число фиктивных слоев,  $j \ge 3$  (их вероятности равны  $P_1 = P_2 = ... = 1/j$ ). Из допущения условия, что их абсолютные проницаемости подчиняются неравенству  $K_1 < K_2 < ... < K_j$ , система (9) имеет только одно решение по причине наличия в ней 2j линейных уравнений и 2j неизвестных  $S_1, S_2, ..., S_j$  и  $K_1, K_2, ..., K_j$ . Решая ее, вычислим проницаемости  $K_1, K_2, ..., K_j$ , которые необходимы для построения нужного фиктивного слоистого слоя. При решении аналогичной задачи для водной фазы вместо второго уравнения в (9) используем формулу  $\frac{K_{\rm B}(S_i)}{S_{\rm n}(S_i)} \cdot \frac{K_l - J(S_i)}{K_l} = K_{\rm B}^{\rm M}(S_i)$ . Полученная система также имеет одно решение при тех же

допущениях. В итоге определено, что для каждого однородного слоя определяем ряд  $K_i$ ,  $H_i$  и представляем этот реальный однородный слой в виде фиктивного слоистого слоя, состоящего из полученного ряда однородных слоев.

Итак, доказана возможность предложенного физического и математического метода построения фиктивного слоистого пласта отдельно для каждой из фаз. Далее идет построение МФП для каждой фазы. Отметим наличие в различных публикациях единых рекомендаций по использованию в хорошо проницаемых слоях линейных ОФП  $K_{\rm B}(S)$  и  $K_{\rm H}(S)$  [1–3] и для плохо проницаемых слоев – квадратичные или кубические ОФП.

### Различные формулы МПФ для моделей, численные расчеты, анализ показателей разработки слоистых пластов

Далее приведены численные расчеты для пласта, состоящего из пяти слоев одинаковой толщины, имеющих разные функции исходных лабораторных ОФП по слоям. Такой пласт будем обозначать «пласт 1». В нем имеем

$$\begin{split} K_{\scriptscriptstyle B}(S) &= K_{\scriptscriptstyle B_0} \cdot \left[S_{\scriptscriptstyle \Pi}(S)\right]^2 \text{ при } i = 1, \ 2, \ 4, \ 5; \ K_{\scriptscriptstyle B}(S) = K_{\scriptscriptstyle B_0} \cdot \left[S_{\scriptscriptstyle \Pi}(S)\right]^{1,5} \text{ при } i = 3; \\ K_{\scriptscriptstyle H}(S) &= K_{\scriptscriptstyle H_0} \cdot \left[1 - S_{\scriptscriptstyle \Pi}(S)\right]^2 \text{ при } i = 1, \ 2, \ 4, \ 5; \ K_{\scriptscriptstyle H}(S) = K_{\scriptscriptstyle H_0} \cdot \left[1 - S_{\scriptscriptstyle \Pi}(S)\right] \text{ при } i = 3. \end{split}$$

Изучаем равномерный закон при коэффициенте вариации v = 0,55, при значениях абсолютной проницаемости слоев  $K_1 = 0,1$  Д,  $K_2 = 0,3$  Д,  $K_3 = 0,5$  Д,  $K_4 = 0,7$  Д,  $K_5 = 0,9$  Д (где Д – дарси – единица проницаемости пористых сред, 1 Д приблизительно равен  $1,02 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>). По аналогии с работами [4–7] рассматриваем и одномерное решение простейшей модели *C*: оно использует в качестве ОФП средние по толщине пласта величины вида

$$K_{\scriptscriptstyle B}(S) = \left[\frac{1}{H} \cdot \sum_{i=1}^{n} H_i \cdot K_{\scriptscriptstyle B}(S)\right],$$

$$K_{\scriptscriptstyle H}(S) = \left[\frac{1}{H} \cdot \sum_{i=1}^{n} H_i \cdot K_{\scriptscriptstyle H}(S)\right].$$
(10)

В работе также приводится еще один метод вычисления МФП  $K'_{\rm B}(S)$ ,  $K'_{\rm H}(S)$ , где

$$K_{\scriptscriptstyle B}'(S) = \left[\frac{1}{H} \cdot \sum_{i=1}^{n} H_{i} \cdot K_{\scriptscriptstyle B}(S)\right] \cdot A(S),$$

$$K_{\scriptscriptstyle H}'(S) = \left[\frac{1}{H} \cdot \sum_{i=1}^{n} H_{i} \cdot K_{\scriptscriptstyle H}(S)\right] \cdot B(S).$$
(11)

Здесь функции  $A(S) = [1 + V \cdot \sqrt{3}(1 - S_n(S))], B(S) = [1 - V \cdot \sqrt{3} \cdot S_n(S)]$  получены коррекцией проницаемостей (10) известными коэффициентами  $\langle K_B(S) \rangle, \langle K_H(S) \rangle$  [4–6]. Одномерная модель с МФП проницаемостями (11) и средней по толщине пласта абсолютной проницаемостью обозначим модель *BC*. Осредненное решение, определенное формулами МФП (8) и средней абсолютной проницаемостью, обозначим «решение  $\overline{K}'_H(S)$ » (модель  $K_B(S)$ ). Для этой модели известные коэффициенты  $A(S) = \frac{\overline{K}_B}{K^*}$  и

$$B(S) = \frac{\kappa_{\rm H}}{K^*}$$
 равномерного закона определены так [4, 5]:  
$$A(S) = \left[1 + V \cdot \sqrt{3} \left(1 - S_{\rm n}(S)\right)\right], \quad B(S) = \left[1 - V \cdot \sqrt{3}S_{\rm n}(S)\right]. \tag{12}$$

На рис. 1 приведены численные графики функций вида (10) и МФП вида (11). На рис. 2 показаны графически кривые ОФП пласта 1 и МФП вида (11).

На рис. 3 показаны графики кривых МФП  $K_{\rm B}^{\rm M}$  и  $K_{\rm H}^{\rm M}$  вида (8). Как видим, имеет место по каждой фазе практическое совпадение обоих этих графиков. Графики результатов проведенных вычислительных экспериментов по изучению погрешностей этих трех осредненных моделей представлены на рис. 4. Это графики для коэффициентов нефтеотдачи в зависимости от времени разработки для случая одномерного течения (формулы (8), (10), (11)). Здесь же показан график двумерного профильного течения – эталон A. Взаимное размещение полученных графиков аналогично графикам, полученным в работах [4–6]. На рис. 4 также определено, что эталонная кривая решения A проходит между одномерными решениями B (BC) и C. Аналогичные результаты характерны и для других показателей разработки. Для коэффициента нефтеотдачи B закономерно, что решение C расположено выше решения A, а кривая B (BC) – ниже. Графики для доли воды в потоке F имеют иное расположение (рис. 5). Кривая C занижает решение графика A, а решение B (BC) завышает его. При этом кривая B (BC) точнее приближается к графику эталона относительно графика C для всех показателей разработки.



В данной работе дан анализ результатов вычислительных экспериментов только для случая изотермической двухфазной фильтрации. При рассмотрении неизотермической фильтрации вводим допущение о постоянстве по вертикали температуры для каждого вертикального сечении пласта. Тогда все предложенные в данной работе формулы МФП осредненных моделей остаются в силе. В связи с этим имеют место аналогичные положительные оценки при проведении вычислительных экспериментов для холодного и горячего заводнений рассмотренных слоистых пластов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Булыгин В.Я. Гидродинамика нефтяного пласта. М.: Недра, 1974. 232 с.
- 2. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат, 1963. 396 с.
- 3. *Ентов В.М., Зазовский А.Ф.* Гидродинамика процессов повышения нефтеотдачи. М.: Недра, 1989. 233 с.
- 4. Плохотников С.П., Елисеенков В.В. Гидродинамические расчеты в слоистых пластах на основе модифицированных относительных проницаемостей // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 5. С. 115–121.

ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 1

- 5. Богомолов В.А. и др. Модифицированные проницаемости, основанные на модели схемы струй для бета-распределения и его частных случаев // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2010. С. 171–175.
- 6. Bogomolov V.A. et al. Mathematical simulation of three-phase filtration in stratified beds with account for the scheme of jets // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2011. Vol. 84. № 5. P. 975–979.
- 7. Плохотников С.П. и др. Модифицированные ОФП в осредненных моделях фильтрации при закачке в пласт полимерных растворов различной концентрации // Вестник КНИТУ. 2012. Т. 15. № 1. С. 55–58.

Поступила в редколлегию 30.01.19

# SOLUTION OF A PROBLEM OF AVERAGING THE COEFFICIENTS OF THE SYSTEM OF ELLIPTIC AND PARABOLIC EQUATIONS

R.K. Ahmad, S.P. Plokhotnikov, S.V. Nikiforova, and Y. ALGabri

We consider the issues of averaging the physical parameters, which are the coefficients of the original system of differential equations of elliptic and parabolic types, for example, the construction of averaged models to solve the problem of two-phase non-isothermal filtration.

Keywords: elliptic and parabolic equations, non-isothermal two-phase filtration, averaged parameter, coefficients of the system of differential equations.

Ахмад Рами Камал – аспирант (КНИТУ, Казань) E-mail: belova-elena-n@mail.ru

**Плохотников Сергей Павлович** – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: plokhotnikov@kstu.ru

**Никифорова Светлана Витальевна** – канд. физ.-мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: svetlana1605@yandex.ru

Аль Джабри Адель Яхья Али – аспирант (КНИТУ, Казань) E-mail: aljabriadel2018@gmail.com
### ФОРМИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ

### Б.А. Тимеркаев, Б.Р. Шакиров, А.А. Калеева, В.С. Фельцингер

Приводятся результаты по исследованию формирования кремниевых наноструктур на катоде электрического разряда. Изучено влияние на вид наноструктур внешних факторов (буферный газ, давление газа, материал подложки), а также внутренних факторов (напряженность электрического поля, величина тока). Показано, что на формы выращенных наноматериалов оказывает существенное влияние как окружающая газовая среда, так и значение напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. Получены кремниевые нанотрубки сложной конфигурации в виде прямого ствола с цилиндрическими отростками, а также однослойные изогнутые нанотрубки. Показано, что при наличии кислорода происходит образование кварцевых шариков диаметром порядка 70 нм.

### Ключевые слова: кремниевые наноструктуры, нанотрубки, электродуговой разряд.

Кремниевые наноматериалы (наночастицы, нанопроволоки, нанотрубки) из-за широких возможностей их применения в электронике, фотовольтаике, батареях привлекают не меньше внимания, чем углеродные наноматериалы [1–9]. В связи с этим очень важно создать надежные условия их выращивания, причем разных форм, и достичь понимания поведения отдельных атомов кремния в процессе выращивания наноматериалов, зависимости свойств таких материалов от их размеров.

Существует множество способов создания кремниевых наноструктур. Наиболее распространенными из них являются химическое газофазное осаждение [1], жидкофазная эпитаксия, зол-гель метод, метод магнетронного распыления [2, 3], вакуумное дуговое осаждение [4], импульсное лазерное осаждение, молекулярно-лучевая эпитаксия [5], ионно-пучковое осаждение. В работе [1] рассматривается способ выращивания кремниевых нанотрубок в реакторе с использованием электрической дуги без использования какого-либо катализатора. Для обеспечения чистоты реактор вакуумируется и заполняется аргоном. Фактическое образование нанотрубок зависит от процесса осаждения химических паров. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, которые в определенной степени отражены в монографии [7]. В работе [8] приведено описание основных методов синтеза, а также методы моделирования атомной структуры кремниевых и германиевых нанотрубок.

В данной работе предлагается метод создания кремниевых наноструктур в электродуговой плазме. Здесь речь идет не о вакуумно-дуговом способе нанесения покрытий, при котором происходит испарение материала катода и его конденсация на подложке, а о классическом способе испарения материала анода и его сборке на катоде. Такой метод описывается в работах [9–13] для получения углеродных наноматериалов.

Несмотря на достигнутые в последние годы успехи в создании кремниевых нанотрубок, нанонитей и нанопокрытий, до сих пор в литературе отсутствуют достоверные сведения о выращивании кремниевых наноструктур за счет электродугового испарения кремния. Исследования в этом направлении наталкиваются на принципиальные трудности, связанные с особенностями кристаллического кремния. Например, организация дугового разряда на поликристаллическом кремнии из-за большой концентрации мощности на катоде приводит к растрескиванию и разрушению кремниевого катода [14]. Как следует из результатов этой работы, поликристаллический катод просуществовал не более 30 с, а это как раз то время, которое необходимо для прогрева катода. В работе [4] после проведения эксперимента более 2 мин наблюдалось оплавление рабочей поверхности и разрушение части катода. Проблему оплавления удалось решить организацией вращения катодного пятна по поверхности катода с применением арочного магнитного поля переменной конфигурации. В то же время дуговое испарение кремния считается одним из наиболее перспективных методов создания концентрированных потоков атомов. Также определенные перспективы имеет дуговое осаждение кремниевых покрытий, так как энергоемкость процессов при этом не превышает 50 эВ/атом, тем более дуговое осаждение позволяет обеспечить высокую однородность кремниевых покрытий. Экспериментальная установка по созданию кремниевых наночастиц в дуговом разряде состояла из вакуумной камеры, системы газоснабжения, источников электрического питания, водоснабжения, а также измерительных приборов.

Водоохлаждаемая вакуумная камера имела цилиндрическую форму диаметром 400 мм с круглыми двухслойными дверьми. С верхней и нижней стороны камеры имеются резьбовые регуляторы межэлектродного расстояния, которые могут перемещать или нижний, или верхний электрод.

На стенках вакуумной камеры также имеются токовводы, которые изготовлены из материала, имеющего малый коэффициент термического расширения. Токовводы обеспечивают подачу в камеру высокого напряжения. Для визуального контроля дверцы камеры снабжены смотровыми окошками. На боковых стенках камеры размещены патрубки для напуска и откачки газов.

### Получение кремниевых наноструктур с помощью электродугового источника постоянного тока

Перед экспериментом вакуумная камера откачивалась вакуумным насосом и заполнялась инертным газом до давления 660 гПа. В качестве катода служила вольфрамовая стержень с диаметром 12 мм, в качестве анода – кремний. Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе с помощью дополнительного источника с напряжением 80 В и током 1 А, подключенного с целью ограничения тока через балластное сопротивление, разогревали кремний примерно 5 мин (без этой процедуры высокое электросопротивление кремния не позволяет пропускать дуговой ток даже при обеспечении прямого контакта между катодом и анодом). После этого электроды быстро переключали на дуговой источник тока и с помощью регуляторов межэлектродного расстояния разрывали контакт до образования устойчивого дугового разряда. Для обеспечения возможности длительной работы и предотвращения капельной формы переноса кремния на поверхность вольфрама электродуговой источник питания тоже подключали через балластное сопротивление, которое ограничивал ток. Балластное сопротивление позволяло регулировать ток с шагом в 5 А. Во время экспериментов ток дуги поддерживался в пределах 15...25 А.

# Получение кремниевых наноструктур с помощью электродугового генератора переменного тока

Генератор рассчитан на работу при давлении не менее 530 гПа и имеет две цепи: цепь питания дуги переменным током низкого напряжения (220 В) и цепь поджига дуги высокочастотным искровым разрядом высокого напряжения малой мощности (цепь активизатора). В дуговом режиме начало процесса горения дуги и последующее его поддержание в каждом полупериоде питающего напряжения обеспечивается высоким напряжением (40 кВ) повышенной частоты, подводимым от активизатора (искрового генератора малой мощности). Активизированная высокочастотным током дуга поддерживается достаточно устойчиво. В ходе эксперимента ток разряда поддерживали в пределах 2,5... 3 А.

Для повышения температуры электродов перед подключением электродугового генератора переменного тока мы заменили источник питания на высоковольтный слаботочный и поддерживали тлеющий разряд напряжением 400 В и силой тока 0,05 А в течение 2 мин. Затем быстро переключили источник питания на электродуговой генератор переменного тока с силой тока около 3 А и напряжением порядка 220 В. В таком варианте дуговой разряд зажегся и началось напыление кремния на вольфрамовую подложку.

Наросты на поверхности катода в дальнейшем были тщательно изучены на сканирующем электронном микроскопе.

### Получение кремниевых наноструктур с применением высоковольтного источника питания с балластным реостатом

Образование кремниевых наноструктур существенно зависит от способа организации электрического разряда. Главная проблема при проведении экспериментов заключается в создании оптимальных условий для роста тех или иных наноструктур. В данном случае мы использовали вакуумную установку, которую применяли в первом опыте, но с другим источником питания. Вакуумная установка, так же как и в первом случае, была заполнена аргоном до давления 660 гПа. На электроды подавали напряжение порядка 80 В. При этом в цепь разряда подключили балластное сопротивление для обеспечения устойчивости разряда. После этого на короткое время замкнули контакты и разомкнули. При этом загорелся разряд с током порядка 8 А и происходил рост отложений на катоде. Эти отложения были тщательно изучены на сканирующем электронном микроскопе.

### Анализ полученных результатов

Электронно-микроскопические исследования полученных на вольфрамовом катоде кремниевых наноструктур в ходе экспериментов с помощью электродугового генератора показывают, что в отложениях содержится большое количество кремниевых наноструктур различной длины и структуры (рис. 1).



Рис. 1. Кремниевые наноструктуры, полученные с применением электродугового источника питания

Кремниевые нанотрубки имеют вид конуса с закрытым торцом. Диаметры нанотрубок колеблются в пределах 20...50 нм, и по этому параметру они похожи на углеродные нанотрубки. Длины же нанотрубок колеблются в пределах 0,5...0,8 мкм. Рост нанотрубок начинается с другой материнской конической поверхности длиной порядка 2 мкм и диаметром порядка 30–100 нм. Электронно-микроскопические картинки не позволяют однозначно говорить о толщине стенок кремниевых нанотрубок, тем не менее по их круглому поперечному сечению можно предположить, что они внутри полые, возможно, многослойные. Характер расположения нанотрубок на материнском теле имеет определенные закономерности: они похожи на сосновый ствол с сучками. При этом эти «сучки» строго вертикальны к «стволу» и расположены так же строго линейно вдоль линии «ствола». Количество направлений роста нанотрубок от ствола равняется шести, и эти направления строго отстоят друг от друга под углом 60° (рис. 2).



Рис. 2. Кремниевые нанотрубки в виде «стволовых» образований с диаметром 30...50 нм, полученные с применением электродугового источника питания

Ценность полученных результатов заключается в том, что кремниевые нанотрубки представляют собой некоторый ансамбль (совокупность) соединенных друг с другом нанообъектов. В связи с этим такие структуры непосредственно можно использовать в качестве анодов литий-ионных элементов, так как площадь поверхности анода из подобных нанокремниевых материалов возрастает на порядки. В то же время прочность этих нанотрубок не вызывает сомнений. В электронно-микроскопических снимках нет ни одной сломанной нанотрубки. Также представлены образцы, полученные с применением высоковольтного источника питания с балластным реостатом, на которых видны кремниевые наноструктуры

ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 1

другого вида (рис. 3). Большое количество образований в виде вьющихся трубок диаметрами 30...40 нм тесно переплетаются.

Область применения кремниевых нанотрубок и нанонитей может быть распространена на литийионные батареи, где графитовый анод успешно может быть заменен на материал из кремниевых нанотрубок [15], светоизлучение [16], а также на нанотранзисторы и нанодиоды. Новые способы синтеза кремниевых нанотрубок применительно к литий-ионным батареям описаны в работе [17]. Основные свойства и области применения нанотубулярных форм кремния и германия также рассмотрены в [8].



Рис. 3. Снимок вьющихся кремниевых наноструктур диаметром от 30 до 40 нм.

Таким образом, в работе представлены способы выращивания кремниевых нанотрубок с помощью электрического разряда с разными значениями напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. Показано, что на формы выращенных наноматериалов оказывает существенное влияние как окружающая газовая среда, так и значение напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. Получены кремниевые наноструктуры довольно сложной, в то же время определенно закономерной конфигурации, которые смогут найти в дальнейшем широкое применение в электронике, фотовольтаике, батареях и даже как конструкционный элемент в композиционных материалах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и РТ в рамках научного проекта №18-43-160005 р\_а и проекта 3.6564.2017/БЧ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Crescenzi M. et al.* Experimental imaging of silicon nanotubes // Applied Physics Letters. 2005. Vol. 86. № 23. P. 231901-1–231901-3.
- 2. *Kima J.H., Chung K.W.* Microstructure and properties of silicon nitride thin films deposited by reactive bias magnetron sputtering // J. Appl. Phys. 1998. № 11. P. 137–140.
- 3. Surmeneva M.A. et al. Adhesion properties of a silicon containing calcium phosphate coating deposited by rf magnetron sputtering on a heated substrate // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. Vol. 7. № 5. P. 944–951.
- 4. Духопельников Д.В. и др. Управление движением катодного пятна в линейных вакуумно-дуговых испарителях // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 11. С. 45–49.
- 5. *Кузнецов В.П., Рубцова Р.А.* Особенности метода сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии Si и его возможности при получении структуры Si: Er / Si // Физика и техника полупроводников. 2000. № 5. С. 519–525.
- 6. *Timerkaev B.A., Andreeva A.A.* Technology of growing silicon nanotubes // Journal of Physics. Conference Series [Electronical Journal] 2018. Vol. 1058. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1058/1/012071/pdf (дата обращения: 5.10.18).
- 7. *Ищенко А.А., Фетисов Г.В., Асланов Л.А.* Нанокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля. М.: Физматлит, 2012. 648 с.
- 8. *Мазуренко Е.А., Дорошенко М.Н., Герасимчук А.И.* Синтез, свойства и моделирование кремниевых и германиевых нанотрубок // Украинский химический журнал. 2008. Т. 74. № 11. С. 3–15.
- Timerkaev B.A., Andreeva A.A., Sofronitskiy A.O. Carbon nanotubes formation in the decomposition of heavy hydrocarbons creeping along the surface of the glow discharge. Low temperature plasma in the processes of functional coating preparation // Journal of Physics: Conference Series [Electronical Journal]. 2016. Vol. 669. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/669/1/012062/pdf (дата обращения: 5.10.18).
- 10. *Тимеркаев Б.А., Андреева А.А., Софроницкий А.О.* Стелющийся по поверхности тлеющий разряд и перспективы его применения // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2015. № 3. С. 5–9.

- Timerkaev B.A., Andreeva A.A., Sofronitskiy A.O. Discharge creeping along the surface in the process for producing nanomaterials // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 927. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/927/1/012068/pdf (дата обращения: 5.10.18).
- 12. Андреева А.А., Тітегкаеv В.А., Ганиева Г.Р. Приповерхностный разряд на границе раздела углеводородное сырье – вакуум. Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий -VI Научно-техническая конференция: сборник статей / Казань: Отечество. 2015. С. 48-52.
- Timerkaev B.A., Andreeva A.A., Sofronitskiy A.O. Discharge creeping along the surface in the process of cleaning and strengthening of the materials surface. Low temperature Plasma in the Processes of Functional Coating Preparation // Journal of Physics: Conference Series [Electronical Journal]. 2017. Vol. 789. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/789/1/012063/pdf (дата обращения: 5.10.18).
- 14. Кесаев И.Г., Пашкова В.В. Электромагнитная фиксация катодного пятна // Журнал технической физики. 1959. Т. 29. № 3. С. 287–298.
- 15. Park M.H. et al. Silicon nanotube battery anodes // Nano Letters. 2009. Vol. 9. P. 3844-3847.
- 16. *Taghinejad M. Taghinejad H.* A Nickel–Gold bilayer catalyst engineering technique for self-assembled growth of highly ordered silicon nanotubes (SiNT) // NanoLetters. 2012. Vol. 13. № 3. P. 889–897.
- 17. Тимеркаев Б.А., Шакиров Б.Р., Тимеркаева Д.Б. Создание кремниевых наноструктур в электродуговом разряде // Химия высоких энергий. 2019. № 2. С. 155–160.

Поступила в редколлегию 8.10.18

### FORMATION OF SILICON NANOSTRUCTURES IN ELECTRICAL DISCHARGE

### B.A. Timerkaev, B.R. Shakirov, A.A. Kaleeva, and V.S. Fel'tsinger

The paper presents the results of studying the formation of silicon nanostructures at the cathode of an electric discharge. The influence of external factors (buffer gas, gas pressure, substrate material) as well as internal factors (electric field strength, current) on the type of nanostructures was studied. It is shown that the forms of the grown nanomaterials are significantly affected by both the surrounding gaseous medium and the value of the electric field strength in the interelectrode gap. Silicon nanotubes of complex configuration in the form of a straight barrel with cylindrical processes as well as single-layer curved nanotubes were obtained. It is shown that, in the presence of oxygen, the formation of quartz beads with a diameter of about 70 nm occurs.

Keywords: silicon nanostructures, nanotubes, electric arc discharge.

**Тимеркаев Борис Ахунович** – д-р физ.-мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: btimerkaev@gmail.com

Шакиров Булат Рузалевич – студент (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: bulatshoker123456789@gmail.com

Калеева Анжелика Алексеевна – ассистент (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: andreeva.anzhelika.a@yandex.ru

Фельцингер Василина Сергеевна – магистрант (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: vasiliyfe@mail.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНОГО НЕФТЯНОГО ПЛАСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО СО<sub>2</sub> И ОТОРОЧЕК СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО СО<sub>2</sub> И ВОДЫ

### А.А. Давлетшин, А.В. Радаев, А.А. Мухамадиев, А.Н. Сабирзянов

Создан экспериментальный стенд для исследования процесса вытеснения нефти сверхкритическим  $CO_2$  и оторочками сверхкритического  $CO_2$  и воды из однородной и неоднородной насыпной и керновой модели нефтяного пласта в интервале давлений до 25 МПа, температур до 100 °C. Разработана оригинальная методика проведения эксперимента на однородной модели насыпного пласта с использованием сверхкритических флюидных систем. Проведены пробные опыты.

Ключевые слова: однородная модель насыпного пласта, сверхкритические флюидные системы, оторочки сверхкритического CO<sub>2</sub>, керновая модель нефтяного пласта, насыпная модель терригенного пласта.

#### Введение

В настоящее время для исследования процессов вытеснения нефти применяются экспериментальные установки следующих конструкций: для исследования процесса вытеснения нефти ПАВами и полимерами [1–5], для исследования паротеплового воздействия на пласт [6], а также для исследования газового и водогазового воздействия на пласт при вытеснении нефтей и газоконденсатов [6–9]. Существующие экспериментальные установки не в полной мере удовлетворяют требованиям по исследованию процесса фильтрации сверхкритических флюидных систем, прежде всего потому, что особым требованиям должна удовлетворять модель нефтяного пласта. Приведем требования.

1. Модель пласта должна включать систему противодавления, гарантирующую минимальный градиент давления между входом в модель пласта и выходом из нее, а также вытеснение исследуемой нефти не в атмосферу, а в сосуд, в котором давление поддерживается на 0,5–1,0 МПа выше.

2. Конструкция кернодержателя должна обеспечивать отсутствие байпаса сверхкритического флюида (СКФ) в стыке керна со стенкой кернодержателя, для чего должна быть предусмотрена винтовая нарезка по всей длине кернодержателя при использовании насыпной модели пласта либо втулка между стенкой кернодержателя и керном из эластичного материала, поджимающаяся жидкостью высокой плотности при использовании реальных кернов.

3. Должен быть обеспечен контроль давления по всей длине модели пласта для исключения снижения давления ниже критического.

4. Должна обеспечиваться возможность моделирования неоднородных пластов.

Всем перечисленным условиям удовлетворяет разработанная авторами экспериментальная установка, конструкция которой является оригинальной, позволяющей проводить исследования процессов фильтрации СКФ в однородных и неоднородных пористых средах в широком интервале давлений, температур СКФ, проницаемости модели пласта и вязкости нефти, а также различных режимов закачки вытесняющего агента (чистый сверхкритический CO<sub>2</sub>, оторочки сверхкритического CO<sub>2</sub> и воды, водогазовые смеси на основе СК CO<sub>2</sub>). Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, схема кернодержателя для насыпной модели пласта – на рис. 2.

Установка позволяет проводить исследования процесса вытеснения нефти СК  $CO_2$ , оторочками СК  $CO_2$  и воды, из моделей однородного и неоднородного пласта в диапазоне давлений до 20 МПа и температур до 100 °С.

В настоящей работе применялась насыпная модель терригенного пласта, кернодержатель которой выполнялся в соответствии с требованиями к сосудам высокого давления [10] и моделировала микронеоднородный пласт. Микронеоднородный тип пористой среды обеспечивается набивкой в кернодержатель пористой среды различной фракций. Кернодержатель представлял собой сосуд высокого давления длиной 700 мм и внутренним диаметром 28 мм. На внутренней части цилиндрической поверхности нанесена риска, оставленная после черновой токарной обработки, предназначенная для предотвращения возможности байпасирования флюидов по внутренней стенке аппарата. Конструкция оснащена термостатирующим нагревательным кабелем, намотанным на внешнюю часть цилиндрической поверхности. Степень нагрева контролируется измерителем-регулятором ТРМ-138 ТУ 4211-003-46526536-03, на который поступает информация о температуре с термопар, расположенных на внешней цилиндрической поверхности ячейки. Для снижения тепловых потерь модель пласта завернута в теплоизоляционную стекловату. Кернодержатель для насыпной модели пласта (рис. 2) состоит из следующих компонентов: *1* – цилиндрическая обечайка, *3*, *4* – фланец, *5* – штуцер, *6* – прокладка, *7* – сетка.



Рис. 1. Схема экспериментального стенда: *1* – модель пласта; *2* – бак питательный с водой; *3* – бак питательный с нефтью; *4* – сборник нефти и эмульсий; *5* – приемная емкость газов; *6* – приемная емкость масла; *7* – колба Бунзена; *8* – баллон с газом; *9* – насос высокого давления для закачки воды или нефти; *10* – насос высокого давления для закачки жидкого диоксида углерода; *11* – вакуумный насос; *12* – расходомер воды; *13* – расходомер нефти; *14*, *15* – СО<sub>2</sub>-расходомеры; *16–19* – манометры; *20* – сепаратор; *21* – фильтр; *22* – криотермостат; *23* – термостат нагревающий; *24–33* – вентили запорные; системы и узлы: I – модель пласта, II – узел закачки воды, III – узел закачки СО<sub>2</sub>, IV – система насыщения пласта нефтью и водой, V – узел создания оторочек СО<sub>2</sub> и воды, VI – узел измерения градиента давления, VII – узел противодавления и пробоотбора



Рис. 2. Схема кернодержателя для насыпной модели пласта

Конструкция выполнена из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т и выдерживает давление до 40 МПа при температуре 90 °C. Фланцы стягиваются шпильками М16-6g х 120.58 ГОСТ 22034-76. Надежное уплотнение обеспечивается за счет качественно выполненных фланцев типа «шип – паз» с минимальным допуском посадки и использованием прокладки, выполненной из фторопласта-4Д по ГОСТ 14906-77 между фланцами в месте уплотнения. Во фланцах предусмотрено углубление для установки сетки, зажатой между двух перфорированных пластинок. Сетка предотвращает высыпание песка из модели пласта, при этом не создает значительных гидравлических сопротивлений. Аппарат после сварочных работ был проверен на рентгене на 100 % и был подвержен опрессовке при 45 МПа.

Узел нагнетания воды в пласт служит для закачки воды в пласт с целью вытеснения нефти из модели пласта и создания остаточной водонасыщенности. Узел нагнетания воды в пласт (рис. 3) состоит из следующих частей: питательный бак для воды, расходомер-счетчик для регистрации объема закачиваемой воды, плунжерного насоса высокого давления, термостата с змеевиком, по которому проходит термостатируемая вода нагнетаемая в модель пласта. Все части узла нагнетания воды в пласт соединяются толстостенной трубкой 1/8 дюйма. Давление нагнетания вытесняющей воды задается при помощи контактного манометра. Узел нагнетания CO<sub>2</sub> в модель пласта (рис. 4) предназначен для подготовки и нагнетания CK CO<sub>2</sub> в модель пласта. Узел состоит из следующих компонентов: баллона с CO<sub>2</sub> *1*, расходомера *2*, насоса поршневого высокого давления *3*, датчика давления *4*, термостата *5*. Все части узла соединены толстостенной (капиллярной) трубкой 1/8 дюйма из нержавеющей стали марки 12X18H10T. Узел нагнетания CO<sub>2</sub> предназначен для подготовки и нагнетания CK CO<sub>2</sub> в модель пласта. Данный узел подключается на вход в модель пласта как показано на рис. 2. Насос модели P-20 (фирма «Waters» (США)) со встроенным датчиком давления, используемый в данном узле, позволяет устанавливать давление нагнетаемого CO<sub>2</sub> в диапазоне 5…60 МПа и расходом от 0,01 до 20 г в минуту. Расходомер «Siemens» (Германия), используемый в данном узле, позволяет устанавливать давления), используемый в данном узле, позволяет устанавливать давление нагнетаемого CO<sub>2</sub> в диапазоне 5…60 МПа и расходом от 0,01 до 20 г в минуту. Расходомер «Siemens» (Германия), используемый в данном узле, позволяет устанавливать давления. Погрешностью не более 0,01 г/мин. Криотермостат *6* в данном узле используется для термостатирования (нагревания) CO<sub>2</sub> до экспериментальной температуры. Погрешность задания температуры CO<sub>2</sub> в криотермостате составляет ±0,1°С.



Рис. 3. Узел нагнетания воды в модель пласта



Рис. 4. Узел нагнетания СКСО2

Кроме того, экспериментальный стенд содержит узел создания противодавления и пробоотбора, узел измерения градиента давления, узел создания оторочек сверхкритического CO<sub>2</sub> и воды, систему регулирования температуры и термостатирования модели пласта, систему регулирования давления.

#### Методика проведения эксперимента

Перед проведением эксперимента осуществляется определение абсолютной проницаемости пористой среды в соответствии с работой [11]. Моделирование процесса заводнения модели пласта заключается в создании остаточной водонасыщенности пористой среды.

Схема проведения эксперимента по созданию остаточной нефтенасыщенности модели пласта приведена на рис. 5. Для проведения эксперимента по исследованию процесса вытеснения нефти водой предварительно заполняется питательный бак водой дистиллированной, открываются вентили.



Рис. 5. Схема обводнения модели пласта: 1 – насос высокого давления; 2 – расходомер воды; 3, 7, 9 – вентили запорные; 4 –бак питательный с водой; 5 – манометр; 6 –термостат; 8 – модель нефтяного пласта; 10 – фильтр; 11 – регулятор обратного давления; 12 – нефтесборник

В ходе эксперимента отбираются пробы из нефтесборника, тем самым нефтесборник полностью не наполняется (100 мл).

Коэффициент вытеснения нефти водой  $\beta_{\scriptscriptstyle B}$  и нефтью  $\eta_{\scriptscriptstyle Hedythete}$  определяется по уравнению:

$$\beta_{\rm B}\left(\eta_{\rm He\phi Tb}\right) = \sum \frac{V_{\rm He\phi Tb}^{i}}{V_{\rm He\phi Tb}^{\rm Hau}},\tag{1}$$

где  $V_{\text{нефть}}^{i}$  – объем вытесняемой нефти, мл;  $V_{\text{нефть}}^{\text{нач}}$  – объем нефти, первоначально содержащейся в модели пласта, мл.

## Моделирование процесса вытеснения нефти при помощи сверхкритического диоксида углерода

Эксперимент по довытеснению нефти сверхкритическим CO<sub>2</sub> из модели обводненного пласта осуществляется постоянной закачкой углекислого газа в кернодержатель. Во время эксперимента по исследованию процесса вытеснения нефти при помощи сверхкритического CO<sub>2</sub> записываются следующие данные:

1) время, объем и масса отобранной пробы из нефтесборника;

2) объем нефти  $V_{\text{нефть}}^{i}$  и воды  $V_{\text{в}}^{i}$  в отобранной пробе;

3) давление на входе и на выходе (показания на BPR) пласта  $(P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}})$ ;

4) температура и давление проведения эксперимента;

5) масса прикачанного CO<sub>2</sub>  $(M_{CO_2})$ .

На экспериментальной установке были проведены пробные опыты, результаты которых сравнивались с результатами [12]. Вытеснение нефти производилось при параметрах, приведенных в таблице. Вытеснение производилось в два этапа: сначала водой – с целью создания остаточной нефтенасыщенности, затем CO<sub>2</sub> в количестве 6–8 поровых объемов. В ходе вытеснения водой определялся коэффициент вытеснения нефти. При достижении максимального коэффициента вытеснения и стабилизации (выхода на плато по графику) определялась фазовая проницаемость пористой среды для воды. Затем через модель пласта прокачивался CO<sub>2</sub>. Результаты эксперимента приведены на рис 6.

Условия проведения опытов						
Параметры	Настоящая работа	Работа [12]				
Температура, °С	67	67				
Пластовое давление, МПа	7,5	7,5				
Вязкость модели нефти	1,58	1,68				
Расход вытесняющего агента, см <sup>3</sup> /мин	0,1	0,1				
Градиент давления на модели, МПа/м: при вытеснении / после воздействия	0,4/0,57	0,47/0,62				



Рис. 6. Результаты пробных опытов по довытеснению нефти из обводненной пористой среды с использованием сверхкритического CO<sub>2</sub>

Максимальное отклонение опытных данных, полученных в настоящей работе, от приведенных в работе [12] не превышает 10,2 %, что указывает на надежность выбранной методики проведения эксперимента и корректность выбора модели нефти.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриевский А.Д., Косушанский Д.А. Результаты промысловых испытаний и внедрения полимерногелевой технологии «ТЕМПОСКРИН» в условиях нефтяных месторождений НК «Роснефть» // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2005. № 12. С. 44–50.

ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 1

- 2. Шакиров А.Н., Козин В.Г. Реагент КС-6 для повышения добычи нефти // Нефтяное хозяйство. 2002. № 9. С. 64–66.
- К. Бриза. Обоснование технологии полимерного заводнения залежей высоковязкой нефти (на примере месторождения Ждаанице – Чешская Республика): Автореф. ... дис. канд. техн. наук. СПб.: С.-Петерб. гос. гор. ин-т им. Г.В. Плеханова, 2010.-20 с.
- 4. Баранов В.Е. Лабораторные исследования влияния полимерного заводнения на коэффициент вытеснения / Материалы всерос. форума с междунар. участием, посвященный 150-летию академика Обручева В.А., 130-летию академика Усова М.А. и 1200-летию профессора Урванцева Н.Н., г. Томск, 24–27 сент. 2013. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. С. 55–58.
- 5. *Kovsek A.R., Bertin H.J.* Foam mobility in heterogeneous porous media // Transport in porous media. 2003. №52. P. 17–35.
- 6. *Антониади Д.Г.* Научные основы разработки нефтяных месторождений термическими методами. М.: Недра, 1995. 313 с.
- 7. *Маринин В.И.* Физическое моделирование процессов вытеснения на примере нефтяной оторочки Ен-Яхтинского нефтегазоконденсатного месторождения // Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. 2011. № 2 (7). Ч. 2. С. 6–14.
- 8. Макатров А.К. Физическое моделирование водогазового воздействия на залежи нефти в осложненных горно-геологических условиях: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. Уфа: БашГУ, 2006. 24 с.
- 9. *Bagci A.S.* Investigation of WAG process using horizontal wells // Energy Sources. Pt A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2006. Vol. 28. Iss. 6. P. 549–558.
- 10. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты высокого давления. Нормы и методы расчета на прочность. М.: Изд-во стандартов, 1990. 53 с.
- 11. ОСТ 39-195-86. Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. М.: Изд-во стандартов, 1986. 20 с.
- 12. *Tiwari S., Kumar S.* SPE middle east oil show. «CO<sub>2</sub> injection for simultaneous exploitation of gas cap // Proc. of the Offshore Technology Conference, Sept. 2001, Bahrain. P. 497–512.

Поступила в редколлегию 8.02.19

### AN EXPERIMENTAL TEST BED FOR STUDYING THE PROCESS OF OIL DISPLACEMENT FROM THE HETEROGENEOUS MODEL OF OIL RESERVOIR BY SUPERCRITICAL CO<sub>2</sub> AND FRINGES OF SUPERCRITICAL CO<sub>2</sub> AND WATER

### A.A. Davletshin, A.V. Radaev, A.A. Mukhamadiev, and A.N. Sabirzyanov

An experimental test bed was created to study the process of oil displacement by supercritical  $CO_2$  and fringes of supercritical  $CO_2$  and water from a homogeneous and heterogeneous bulk and core models of an oil reservoir in the range of pressures up to 25 MPa and temperatures up to 100 °C. An original technique was developed for conducting an experiment on a homogeneous model of a bulk formation using supercritical fluid systems. Trial experiments were conducted.

Keywords: homogeneous bulk reservoir model, supercritical fluid systems, supercritical CO<sub>2</sub> fringes, core oil reservoir model, terrigenous reservoir model.

Давлетшин Адель Альбертович – аспирант (КНИТУ, Казань) E-mail: asgardtat@gmail.com

Радаев Андрей Викторович – канд. техн. наук (КНИТУ, Казань) E-mail: radaev neftianik@mail.ru

**Мухамадиев Анвар Ахнафович** – канд. техн. наук (КНИТУ, Казань) E-mail: anv mukhamadiev@mail.ru

Сабирзянов Айдар Назимович – д-р техн. наук (КНИТУ, Казань) E-mail: sabirz@kstu.ru

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМЕШИВАЮЩЕГОСЯ РЕЖИМА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ СО<sub>2</sub> ИЗ ОДНОРОДНОГО ПЛАСТА НА КОЭФФИЦИЕНТ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ

### И.Д. Закиев, А.В. Радаев, А.А. Мухамадиев, А.Н. Сабирзянов

Проведен обзор работ, в которых исследовался смешивающийся режим вытеснения нефти газами. Проведены исследования процесса вытеснения вязкой нефти из однородного пласта обводненностью 8 % сверхкритическим CO<sub>2</sub>. Сделан обзор по методам расчета теплофизических свойств многокомпонентных углеводородных систем. Получены новые экспериментальные данные по коэффициенту вытеснения нефти в интервале давлений 8...12 МПа на изотермах 313 и 333 К. Выявлено, что коэффициент вытеснения нефти при температуре 313 К выше, чем при температуре 333 К во всем исследованном интервале давлений.

Ключевые слова: сверхкритический флюид, трудноизвлекаемая нефть, обводненный однородный пласт, коэффициент вытеснения нефти, экспериментальный стенд, остаточная нефтенасыщенность.

#### Введение

Для вовлечения в освоение высоковязких нефтей необходима разработка третичных методов увеличения нефтеотдачи, один из которых основан на применении сверхкритических вытесняющих агентов. Свойства CO<sub>2</sub> в сверхкритическом состоянии промежуточные между его свойствами в газовой и жидкой фазе: у него высокая плотность, близкая к плотности жидкости, и низкая кинематическая вязкость, а также высокий коэффициент диффузии. Высокая эффективность применения сверхкритических флюидных систем при вытеснении вязкой нефти из пористой среды в соответствии с современными представлениями связана со значительным снижением межфазного поверхностного натяжения на границе нефть – сверхкритический углекислый газ, и это снижение тем значительнее, чем выше давление [1]. Давление также оказывает значительное влияние на растворимость газов в нефтях. Там же приведены изотермы растворимости, из которых видно, что в наиболее интересной с практической точки зрения области давлений (примерно до 18...20 МПа) для хорошо растворимых в нефти газов (углекислый газ, углеводородные газы) изотермы растворимости характеризуются резким подъемом. Увеличение растворимости газа приводит к переходу системы нефть – газ/сверхкритический флюид в однофазное состояние и исчезновениюем межфазной границы раздела и, как следствие, к режиму смешивающегося вытеснения нефти.

Смешивающийся режим нефти различным газами исследовался в многочисленных работах в нашей стране [2–12] и за рубежом [13,14].

В работах [2–5] проведен большой объем экспериментальных исследований на физических моделях однородного и неоднородного нефтяного пласта и теоретические исследования процесса вытеснения нефти углеводородными газами, а в работах [6–9] – углекислым газом. В работах [8, 9] в результате экспериментальных исследований сделан вывод о том, что использование диоксида углерода в сверхкритическом состоянии позволяет увеличить коэффициент вытеснения нефти (КВН) в два раза по отношению к нагнетанию углекислого газа в пласт при докритических параметрах состояния. В соответствии с [6, 7] механизм многоконтактного смешивающегося режима вытеснения нефти углекислым газом представляется следующим образом. Углекислый газ некоторого состава, поступая в пласт, контактирует с нефтью. При этом в результате обмена компонентами нефть отдает часть из них углекислому газу, который становится обогащенным и образует на фронте вытеснения фазу, близкую по составу к нефти. Сверхкритический CO<sub>2</sub> может экстрагировать из нефти углеводородные компоненты до С<sub>30</sub> включительно [10].

В последующем при контакте с новыми порциями нефти углекислый газ все больше обогащается углеводородами. Этот процесс будет проходить до тех пор, пока состав нефти не станет находящимся в критической точке при данных условиях. Затем двухфазный поток переходит в однофазный, и состав смеси будет изменяться вдоль пласта от области вытесняющего углекислого газа до области вытесняемой нефти без поверхности раздела.

#### Экспериментальная часть

В настоящей работе на созданной экспериментальной установке [15, 16] проведены экспериментальные исследования процесса вытеснения вязкой нефти из однородного пласта обводненностью 8 % сверхкритическим CO<sub>2</sub>. Эксперименты проведены в соответствии с ОСТ 39195-86 [17]. Целью исследований было определение коэффициента вытеснения нефти (КВН) сверхкритическим CO<sub>2</sub> из однородной модели пласта низкой степени обводненности. Результаты исследований приведены на рис. 1, 2.





Рис. 1. Результаты исследований процесса вытеснения нефти сверхкритическим CO<sub>2</sub> из однородного пласта в интервале давлений от 8 до 12 МПа на изотерме 313 К

Рис. 2. Результаты исследований процесса вытеснения нефти сверхкритическим CO<sub>2</sub> из однородного пласта в интервале давлений от 8 до 12 МПа на изотерме 33 К

Установлено, что повышение температуры нагнетания диоксида углерода приводит к уменьшению КВН на всех исследованных изобарах (значение КВН на рис. 2 на всех исследованных изобарах ниже, чем на рис. 1). Определяющую роль в этом играет значительное снижение растворимости диоксида углерода в углеводороде при повышении температуры [18] на исследованных изотермах, превалирующее над повышением его подвижности вследствие снижения вязкости. Следствием этого является тот факт, что выравнивания фронта при высоких температурах не происходит. Это приводит к преждевременным прорывам вытесняющего агента. Вместе с тем высокий КВН, полученный в настоящих исследованиях, позволяет сделать вывод о том, что процесс вытеснения происходит преимущественно в смешивающемся режиме. Об этом можно судить по результатам исследования [19], а именно по кинетике процесса вытеснения нефти. Было отмечено, что время проведения эксперимента не изменяется в пределах погрешности эксперимента при увеличении вязкости вытесняемой нефти (8,5–9 ч). Кроме того, измерение градиента давления показало, что его значение в опытах с маловязкой нефтью не превышало 0,2–0,3 МПа на длине модели 2 м, а при увеличении вязкости нефти значение градиента давления увеличилось до 0,4-0,6 МПа. Меньшие значения градиент давления принимает при преимущественно смешанном режиме фильтрации, что соответствует выводам работы [20].

Математическая модель процесса вытеснения нефти сверхкритическим СО<sub>2</sub> приведена в работе [21].

### Определение теплофизических свойств многокомпонентных систем «нефть – вода – сверхкритический СО<sub>2</sub>»

Решение системы уравнений [21] невозможно без достоверных знаний теплофизических свойств систем сухих и флюидонасыщенных систем «порода – нефть – сверхкритический СО<sub>2</sub>» при термобариче-

ских условиях реальных пластов. Важнейшими из них являются теплоемкость и теплопроводность, определение значений которых приведено далее. В соответствии с работой [21] принимаем, что теплофизические свойства такого рода систем подчиняются правилу аддитивности Нейманна – Коппа.

Теплоемкость системы определяется по уравнению [22] при известном значении пористости пористой среды:

$$C_p^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n C_{pi} \left( \frac{m_1}{m_1 + m_n} \right),\tag{1}$$

где  $C_1...C_n$  – теплоемкость сухой породы, нефти и CO<sub>2</sub>;  $m_1...m_n$  – масса сухой породы, нефти и CO<sub>2</sub>, определяемые при известном значении пористости породы.

В связи с тем что теплоемкость породы при давлениях до 100 МПа практически не зависит от давления, принимаем ее постоянной.

Теплоемкость нефти определяется по уравнениям [23].

Для парафиновых углеводородов:

$$C_p(P,T) = 1,268 + 1,3358 - \frac{\pi}{10}(1,256\tau - 0,087),$$
 (2)

где  $\pi = \frac{P}{P_{\rm kp}}$  – критические температура и давление.

Для ароматических углеводородов:

$$C(P,T) = \frac{A}{\rho(P,T)}.$$
(3)

Здесь

$$A = 1, 7 - Bn_c, \tag{4}$$

где  $n_c$  – число атомов углерода; *B* – постоянная величина,  $B = 2, 2 \cdot 10^{-3}$  для ароматических углеводородов;  $\rho(P,T)$  – плотность нефти при соответствующих давлении и температуре.

Плотность нефти при высоких параметрах состояния определяется следующим образом [24]:

$$\rho_{\rm he\phi tb}(p,T) = \rho_{\rm he\phi tb} + \Delta \rho_{\rm he\phi tb} , \qquad (5)$$

где  $\rho_{\text{нефть}}(p,T) = \rho_T e^{\Gamma(-1,84\cdot10^{-3})}$ , «Г» – газонасыщенность, определяемая по уравнению состояния, в настоящей работе – уравнение состояния Брусиловского [25].

Поправка значения плотности нефти на температуру:

$$\rho_T = \rho_{293} - (1,83 - 0,0013\rho_{293})(T - 293);$$
(6)

$$\rho_{293} = \frac{\rho_{\rm H} + 1,83(T - 293)}{1 + 0,00132(T - 293)} \,. \tag{7}$$

Поправка значения плотности нефти на давление:

$$\Delta \rho_{\rm H} = 1,87 \Big[ 1 + 1,543 \big( P_{\rm Hac} - 0,1 \big) - 1,54 \cdot 10^{-3} \rho_{293} \Big] \big( P - P_{\rm Hac} \big) , \qquad (8)$$

где *Р*<sub>нас</sub> – давление насыщения нефти газом, определяется по работе [26].

Теплоемкость диоксида углерода определяется из работы [27].

Теплопроводность системы «порода – нефть – сверхкритический CO<sub>2</sub>» также определяется по правилу Нейманна – Коппа в соответствии с [28], поэтому уравнение принимает вид

$$\lambda_p^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_{pi} \left( \frac{m_1}{m_1 + m_n} \right). \tag{9}$$

Значения теплопроводности песчаника в широком интервале давлений и температур приведены в работе [28]. В соответствии с работами [29,30] при увеличении давления от 0,1 до 20 МПа наблюдается увеличение теплопроводности в среднем на 5 %, поэтому в настоящей работе принято, что теплопроводность постоянна во всем исследованном диапазоне давлений.

Теплопроводность нефтей определяется по уравнению [23]

$$\lambda_{P,T} = \left[ 0,148 + 7 \cdot 10^{-4} \left( P - P_0 \right) \frac{0,689}{\sqrt{\tau}} \right].$$
(10)

Здесь

 $\tau = \frac{T}{T_{\rm kp}},$ 

где *T*<sub>кр</sub> – критическая температура углеводорода.

Теплопроводность диоксида углерода при высоких параметрах состояния определяется по таблицам [26].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гиматутдинов Ш.К. Физика нефтяного и газового пласта. М.: Недра, 1971. 312 с.
- 2. Жузе Т.П. Роль сжатых газов как растворителей. М.: Недра, 1981. 165 с.
- 3. Степанова Г.С. Газовые и водогазовые методы воздействия на нефтяные пласты. М.: Газоил пресс, 2006. 202 с.
- 4. Степанова Г.С. Фазовые превращения в месторождениях нефти и газа. М.: Недра, 1983. 192 с.
- 5. Закс С.Л. Повышение нефтеотдачи пласта нагнетанием газов. Вытеснение в условиях взаимной растворимости вытесняющей и вытесняемой фаз и обратного испарения. М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефтяной и горно-топливной лит-ры, 1963. 189 с.
- 6. Баллинт В. Применение углекислого газа в добыче нефти. М.: Недра, 1977. 240 с.
- 7. *Вафин Т.Р.* Совершенствование технологии водогазового воздействия на пласт на нестационарном режиме: Автореф. ... дисс. канд. техн. наук. Бугульма: ТатНИПИнефть, 2016. 25 с.
- Филенко Д.Г. и др. Экспериментальная установка для извлечения углеводородов из пористой среды методом сверхкритической флюидной экстракции / Д.Г. Филенко, К.А. Щеколдин, М.Н. Дадашев, В.А. Винокуров // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2012. № 1. С. 40–44.
- 9. Филенко Д.Г. и др. Применение сверхкритических флюидов в нефтепереработке и нефтехимии // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2012. № 1. С. 34–40.
- 10. Langlo S.A.W. Enhanced Oil Recovery by CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>-foam Injection in Fractured Limestone Rocks. [Electronical Resource]. URL: http://bora.uib.no/bitstream/handle/1956/6781/109014858.pdf (дата обращения: 1.02.19).
- 11. Кристеа Н. Подземная гидравлика. М.: Гостоптехиздат, 1962. Т. 1. 491 с.
- 12. Пирвердян А.М. Физика и гидравлика нефтяного пласта. М.: Наука, 1982. 192 с.
- 13. Баллинт В. Применение углекислого газа в добыче нефти. М.: Недра, 1977. 240 с.
- 14. *Радаев А.В. и др.* Установка для исследования процесса вытеснения нефти при термобарических условиях реальных пластов с использованием свехкритических флюидных систем // Вестник КНИТУ. 2009. № 3. С. 96–102.
- 15. *Радаев А.В. и др.* Влияние термобарических условий на коэффициент вытеснения высоковязкой нефти сверхкритическим диоксидом углерода в однородном пласте // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2010. № 2. С. 87–90.
- ОСТ 39-195-86. Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. М.: Изд-во стандартов, 1986. 20 с.
- 17. Дубовкин Н.Ф. и др. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: Справочник. М.: Химия, 1985. 240 с.
- 18. *Радаев А.В. и др.* Влияние термобарических условий на коэффициент вытеснения нефтей различной вязкости сверхкритическим диоксидом углерода // Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. 2009. Ч. 2. С. 27–38.
- Chengyao Song, Daoyong Tony Yang. Optimization of CO<sub>2</sub> Flooding Schemes for Unlocking Resources from Tight Oil Formation // Proc. of the Canadian Unconventional Resources Conference, Oct 30 – Nove. 1, 2012, Calgary, Alberta. P. 116–125.
- 20. А.В. Радаев и др. Модель нестационарной двухфазной двухкомпонентной фильтрации системы «нефть вода» и «нефть вода сверхкритический флюид» в однородной пористой среде // Нефтяное хозяйство. 2016. № 2. С. 48–50.

- 21. *Рамазанова Э.Н.* Теплопроводность горных пород при высоких давлениях, температурах и флюидонасыщении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Из-во С.-Петерб. гос. ун-т информац. технологий, механики и оптики, 2011. 22 с.
- 22. Мустафаев Р.А. Теплофизические свойства углеводородов при высоких параметрах состояния / М.: Энергоатомиздат, 1991. 312 с.
- 23. Брот Р.А., Кутуков С.Е. Определение реофизических параметров газонасыщенных нефтей // Нефтегазовое дело. 2005. С. 2–12.
- 24. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. М: Грааль, 2002. 575 с.
- 25. Пирвердян А.М. Физика и гидравлика нефтяного пласта / А.М. Пирвердян. М.: Наука, 1982. 192 с.
- 26. Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Изд-во стандартов, 1975. 546 с.
- 27. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
- 28. Эмиров С.Н., Рамазанова Э.Н. Теплопроводность песчаников в условиях высоких давлений и температур // Теплофизика высоких температур. 2007. № 2. С. 1–4.
- 29. Юдин В.А. и др. Теплоемкость и теплопроводность пород и флюидов баженовской свиты исходные данные для численного моделирования тепловых способов разработки. М.: ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2015. 225 с.

Поступила в редколлегию 8.02.19

### RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE MIXING MODE OF OIL DISPLACEMENT BY SUPERCRITICAL CO<sub>2</sub> FROM A HOMOGENEOUS RESERVOIR ON THE OIL DISPLACEMENT COEFFICIENT

### I.D. Zakiev, A.V. Radaev, A.A. Mukhamadiev, and A.N. Sabirzyanov

A review of the existing researches on the mixing-up oil displacement mode by gases is carried out. A displacement process of oil from the uniform layer by water content of 8 % supercritical  $CO_2$  is studied. A review on computational methods of thermal properties of multicomponent hydrocarbon systems is made. New experimental data on the coefficient of oil replacement in the pressure range of 8–12 MPa at 313 and 333 K were obtained. It was found that the oil displacement coefficient at 313 K is higher than at 333 K in all pressure range studied.

Keywords: supercritical fluid, hard-to-recover oil, flooded homogeneous reservoir, oil displacement coefficient, experimental test bed, residual oil saturation.

Закиев Ирек Дагсимович – аспирант (КНИТУ, Казань) E-mail: trapgo@gmail.com

Радаев Андрей Викторович – канд. техн. наук (КНИТУ, Казань) E-mail: radaev neftianik@mail.ru

**Мухамадиев Анвар Ахнафович** – канд. техн. наук (КНИТУ, Казань) E-mail: anv\_mukhamadiev@mail.ru

Сабирзянов Айдар Назимович – д-р техн. наук (КНИТУ, Казань) E-mail: sabirz@kstu.ru

### ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

### Е.А. Скорнякова, В.М. Васюков, В.Ш. Сулаберидзе

Проведен анализ цикла планирования высокопроизводительного сборочного производства и выявлены его основные этапы. Обоснована специфика выбора подхода к формированию пользовательского интерфейса при разработке автоматизированной системы планирования, основанной на принципах бережливого производства. Приведен алгоритм осуществления сбора и обработки данных, заложенный в основу разработанной системы, а также критерии эффективности этого процесса – время внесения данных, изменение данных после первичного внесения. Проанализированы причины ошибок ввода, предложены способы их решения при помощи организационных и технических средств, а также приведены результаты улучшения процесса ввода данных.

Ключевые слова: производственное планирование, бережливое производство, автоматизированная система планирования, высокопроизводительное сборочное производства, итеративная разработка, средства валидации.

Существующие в настоящее время программные продукты зачастую не отвечают специфическим требованиям организаций, ввиду этого актуальным остается разработка автоматизированных систем «под ключ». Особенно остро вопрос автоматизации стоит при решении задач, связанных с производственными процессами.

Производственное планирование является одним из самых важных процессов любой организации. Качество производственного плана напрямую влияет на качество выпускаемой продукции и на прибыль компании, что доказывает актуальность и необходимость проводимых исследований [1].

Несмотря на большое количество уже разработанных программных продуктов, их применение на практике вызывает серьезные трудности, связанные со спецификой производимой продукции и организационно-технической системы, уровнем подготовки персонала и т.д. Также следует отметить, что лишь некоторые существующие автоматизированные системы имеют в своем арсенале инструменты бережливого производства [2–5], которые являются обязательными для компаний, стремящихся максимально эффективного использовать свои ресурсы.

Создание производственной стратегии, учитывающей прогнозируемый спрос, мощности оборудования и поставщиков, а также возможности использования человеческих ресурсов, является главной задачей процесса планирования производства и создаваемой автоматизированной системы.

Производственное планирование является процессом, осуществляемым в несколько этапов:

- сбор данных для создания плана;

- создание плана и его версий;

- оценка планов ответственными специалистами.

Каждый из этих этапов нуждается в автоматизации с целью устранения возможных рисков [6] и сокращения времени осуществления рассматриваемого процесса.

Разработка автоматизированной системы производственного планирования в рамках проводимых исследований включала все этапы от постановки задачи до апробации программного продукта в реальных условиях промышленного предприятия.

Первой и одной из ключевых задач при создании системы является формирование интерфейса. Корректно спроектированный интерфейс позволяет повысить качество конечного продукта за счет минимизации влияния рисков некорректного ввода. В случае с процессом планирования невалидные данные приводят к заведомо неверно созданному плану.

Несмотря на активное развитие вычислительных технологий и автоматизацию рабочих мест и процессов обработки информации, первичный ввод данных в информационную систему до сих пор является преимущественно ручным трудом, в ходе которого в полной мере реализуется человеческий фактор в виде разнообразных ошибок [7]. Проблема человеческого фактора может быть минимизирована или исключена полностью при формировании пользовательского интерфейса.

С учетом накопленного опыта разработки и внедрения информационных систем различного уровня и назначения был сделан вывод о том, что создание пользовательского интерфейса системы может быть реализовано двумя путями.

 Разработка интерфейса согласно техническому заданию, сформированному заказчиком. Данный подход упрощает процесс создания и сдачи программного продукта благодаря использованию только формальных требований разработчика, но зачастую приводит к очевидным для ИТ-специалиста огрехам в вопросах эргономики и инженерной психологии;

2. Итеративная разработка интерфейса, которая является достаточно сложной и нетривиальной задачей.

В качестве основы для разработки системы был выбран смешанный вариант, учитывающий техническое задание, описывающее предметную область и проблематику решаемой задачи, а также вариант реализации интерфейса. Данный подход позволяет оперировать проблемноориентированным [8] и личностно-ориентированными методами [9]. Проблемно-ориентированный подход позволяет реализовать терминологическую базу и создавать привязку к техническому процессу. Личностно-ориентированный подход позволяет учитывать специфические знания и навыки оператора.

Итеративный подход в выбранном варианте разработки был выражен в выполнении всей работы над каждым элементом системы согласно циклу PDCA (рис. 1).



Для созданий производственного плана должно быть использовано большое количество вводных данных. На поиск, сбор, обработку и согласование всех данных специалисту отдела производственного планирования необходимо затратить от одного дня до нескольких недель. В рассматриваемом цикле планирования на все перечисленные процессы отводится не более дня, что говорит о необходимости оптимизации данных процессов.

Основными показателями эффективности сбора информации являются:

- время внесения данных;

- изменение данных после первичного внесения (включая ошибки ввода).

Алгоритм сбора и обработки данных в автоматизированной системе представлен на рис. 2.

С целью снижения времени ввода данных и исключения возможных ошибок были использованы компоновочные решения, объединяющие элементы интерфейса в логические структуры, расположенные согласно порядку внесения исходных данных. В качестве примера можно привести форму ввода данных по рабочим сменам (рис. 3), а именно, статус дня, количество смен, количество перерывов, плановые простои производства.





#### Дата: 18.12.2018 Рабочий • Сохранить

### Данные по сменам

I/		
количество	смен	
TOTHING TRO	UNIUTI I	

Количество смен	2				
	1 смена		2 смена		
	Кол-во перерывов	2	Кол-во перерывов	2	
Общее время смены,мин	540		540		
Начало смены	7:00		17:00		
Конец смены	16:00		2:00		
Начало 1 перерыва	9:00		19:00		
Конец 1 перерыва	9:10		19: <b>1</b> 0		
Начало 2 перерыва	12:00		21:00		-
Конец 2 перерыва	12:40		21:40		

#### Запланированные простои

Добавить Удалить

Название	Начало	Конец	Общее время,мин	Смена	Цех отдел
Общезаводское собрание	16:00	16:30	30	1-я смена 🔻	Bce цеха 🔻

Для дальнейшего снижения времени и количества ошибок ввода были использованы следующие средства: маски ввода (формат даты, времени), контроль длины ввода, логический контроль ввода (невозможность ввода «наложенных» друг на друга смен, задание максимального времени смены и т.п.), проверки по словарю (выбор статуса дня, выбор категории плановых остановок производства).

С целью проверки эффективности использованных средств были проведены тесты по внесению данных для 100 календарных дней. Согласно результатам тестов удалось уменьшить количество ошибок ввода данных (рис. 4), а также сократить время на ввод информации для одного рабочего дня в среднем с трех минут до одной.





Следует отметить, что результаты проводимых исследований процесса производственного планирования и разработка автоматизированной системы в целом позволили значительно повысить результативность рассматриваемого процесса и решить проблемы, связанные с его автоматизацией [10].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Скорнякова Е.А., Бабаев С.А. Проблемы принятия оперативных управленческих решений из-за отклонений в процессе производственного планирования высокопроизводительного предприятия // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. № 4. С. 36–39.
- Varshapetian A., Semenova E. Aspects of integration management methods // International Journal for Quality Research. 2015. № 9 (3). P. 481–494.
- 3. *Kelleher JP*. Total quality management in production planning and control // Proc of the 34th International Conference «The Integrated Management Revolution: A Global Competitive Challenge», 1991. P. 180–181.
- 4. *Khanchanapong T. et al.* The unique and complementary effects of manufacturing technologies and lean practices on manufacturing operational performance // International Journal of Production Economics. 2014. Volume 153. Pp. 191-203.
- 5. *Grodzenskiy S.Y., Emanakov I.V., Ovchinnikov S.A.* The concept of lean manufacturing and its application in the enterprise // Information Innovative Technologies. 2017. № 1. P. 227–229.
- Сесина Е.А. Модель движения рисков при оперативном обмене информацией в процессе производственного планирования // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Сб. тр. 9-й Общерос. науч.- практ. конф. СПб., 2017. Т. 2. С. 154–155.
- 7. *Рогозин Д.М.* Ошибки ввода данных открытых вопросов // Социология: Методология, методы, математические модели. 2004. № 19. С. 127–141.
- 8. Ковальчук С.В. и др. Организация человеко-компьютерного взаимодействия в средах компьютерного моделирования на базе облачной инфраструктуры // Прикладная информатика. 2012. № 5 (41). С. 89–102.
- 9. *Гущин А.Н.* Личностно-ориентированные информационные системы. СПб.: БГТУ «Военмех», 2012. 121 с.
- 10. Скорнякова Е.А., Сулаберидзе В.Ш. Проблемы автоматизации процесса производственного планирования // Наука и АСУ 2018: Сб. тез. всерос. науч.-техн. конф., 2018. С. 67.

Поступила в редколлегию 7.12.18

### FEATURES OF USER INTERFACE CREATION FOR AUTOMATED PRODUCTION PLANNING SYSTEM

### E.A. Skornyakova, V.M. Vasyukov, and V.Sh. Sulaberidze

Production planning cycle for a high-productivity assembly plant was analyzed. Stages of planning cycle were determined. Specificity of selecting an approach to user interface generation for the automated planning system based on "lean manufacturing" principles was proved. An algorithm for data gathering and processing assumed as a basis of the developed system and main criteria of efficiency of this process such as time for data input and data change after first input are given. Reasons for errors during the first input were analyzed, ways to solve them with the aid of organizational and technical means were proposed, and results of data input process improvement were also presented.

Keywords: production planning, lean manufacturing, automated planning system, high-productivity assembly plant, iterative development, validation tools.

Скорнякова Елизавета Алексеевна – аспирант (БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург) E-mail: elizavetasesina@mail.ru

Васюков Василий Михайлович – старший преподаватель (БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург) E-mail: c3h6o@mail.ru

Сулаберидзе Владимир Шалвович – д-р техн. наук (СПбГУАП, Санкт-Петербург) E-mail: sula vlad@mail.ru,196627

### ЭВАКУАЦИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА В ГОДЫ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ НА ПРИМЕРЕ ЗАВОДА № 387

### И.А. Гузельбаева, М.Е. Надеждина

Целью данного исследования является изучение истории организации производства эвакуированного предприятия (на примере завода № 387). В статье демонстрируется система управленческих решений на эвакуированном заводе: налаживание производства в критической ситуации дефицита необходимых ресурсов, восполнение звеньев разорванной в начальном периоде Великой Отечественной войны цепи поставок. Рассмотрено применение новых способов повышения эффективности производственной деятельности. Смоделированная производственно-историческая картина обосновывает идею о гибкости производства, раскрывает роль завода № 387 в военно-промышленном комплексе СССР и победе.

Ключевые слова: Великая Отечественная война, эвакуация, завод № 387, поставщики, промышленность, организация производства.

В данной работе применен инновационный подход к исследованию проекта эвакуации и организации производственных процессов по выпуску авиапродукции заводом № 387 (в настоящее время Казанский вертолетный завод) в период Великой Отечественной войны. Данное исследование проведено с опорой на имеющиеся исторические и историографические работы, а также данные, извлеченные из Государственного архива Республики Татарстан.

16 августа 1941 г. советское правительство приняло разработанный по заданию И.В. Сталина «военно-хозяйственный план» на IV квартал 1941 г. по районам Поволжья, Урала, Западной Сибири, Казахстана и Средней Азии. Этот план был рассчитан на перемещение промышленности в восточные районы СССР и форсирование в этих районах военного производства, необходимого для нужд Отечественной войны. Казань стала одним из важнейших эвакопунктов, разместивших производственные мощности из западных районов страны. В Казань было эвакуировано 70 предприятий страны.

А.Ш. Кабирова отмечает: «Перестройка экономики на военный лад осуществлялась максимально быстрыми темпами. Наличие на территории ТАССР профильных заводов и фабрик (многие из которых к этому времени уже приобрели опыт выполнения военных заказов) облегчало ввод в строй эвакуированных предприятий» [1, с. 279].

В 1941 г. в Казань из Ленинграда был эвакуирован авиационный завод № 387 и размещен на территории бывшего завода № 169. Завод № 169 11-го главного управления НКАП СССР расположен в г. Казани в слободе Кызыл армии (Кировский район), на левом берегу реки Казанки в 3 км от пристани на реке Волге и 8 км от казанской железнодорожной станции. С водной пристанью завод связан дамбой, а со станцией железнодорожной веткой [2], причем заводом № 387 выпускалась часть изделий, ранее производимых заводом № 169. Эвакуация осуществлялась в период 23 июля – 22 августа 1941 г. Таким образом, весь эвакуационный период продолжался всего один месяц. Следует отметить, что немецкие войска перерезали путь на восток по железной дороге, и один из эшелонов с людьми и техникой не добрался до Казани.

31 августа был произведен первый самолет. В связи с эвакуацией производственная площадь завода № 387 сократилась в два раза до 12091 м<sup>2</sup> [3]. В первых числах сентября 1941 г. на завод пришло известие об успешных летных испытаниях У-2, произведенного на территории казанского завода. На фронте этот самолет использовался как ночной бомбардировщик, но не являлся боевой машиной.

«Осенью 1941 года в Казань приехал главный конструктор У-2 Николай Поликарпов, который возложил исполнение обязанностей главного конструктора по созданию боевого самолета У-2ВС на начальника конструкторского отдела завода № 387 Григория Бакшаева» [4, с. 24]. Модификация и конструкторские разработки по созданию боевого самолета благодаря работе казанских инженеров были завершены в кратчайшие сроки. Были изменены технические характеристики. Увеличилась полезная нагрузка (с 260 до 584 кг), Самолет вооружили пулеметом Дегтярева, были сконструированы бомбодержатели для подвески бомб в 50, 100 и 200 кг. Проведено оснащение прицелом для бомбометания, замками для подвески бомб, шумопламягасителями, посадочными фарами, аэронавигационными огнями, санитарно-грузовыми кассетами («кассеты Бакшаева»). Был увеличен вес самолета за счет дополнительного оборудования (с 960 до 1350 кг).

Основной продукцией, выпускаемой заводом № 387, являлись: самолеты У-2, авиалыжи 4-с, нервюры к самолету ЛАГГ-3. Самолеты У-2 выпускались с января по декабрь в количестве 1259 шт.

Первый выпуск нервюр к самолету ЛАГГ-3 был осуществлен в мае, а авиалыжи впервые были выпущены в октябре. Структура выпуска основной продукции представлена на рис. 1. Резкий рост выпуска основных видов продукции с мая 1941 года обусловлен началом производства авиалыж 4-с, которые заняли основную долю в общем объеме произведенной продукции (см. рис. 1). Из изделий бывшего завода № 169 завод № 387 продолжал выпускать нервюры к истребителю ЛАГГ-3.

Легкомоторный самолет У-2 впервые был сконструирован в 1927 г. К моменту начала Великой Отечественной войны машина была незаменима в боевых действиях, позволяя решать такие задачи, как эвакуация раненых на любой местности, осуществление разведки, организация связи в военно-полевых условиях, транспортировка. Однако основным назначением самолета У-2 стало участие в боевых действиях в качестве ночного бомбардировщика. Это было обусловлено нехваткой боевых самолетов, в связи с чем была создана ближнебомбардировочная авиация. Изготовление легких ночных бомбардировщиков, обучение на них летного состава, эксплуатация самолетов (оборудование и размеры аэродромов, количество обслуживающего технического персонала, расход горючего, ремонт и т.п.) обходились государству намного дешевле, чем самолеты Пе-2 и Ту-2 [4, с. 14]. Рентабельность применения легкомоторных бомбардировщиков при учете высокого боевого напряжения и низкой зависимости их от времени года и метеорологических условий очевидна. Задача повышения эффективности деятельности предприятия может рассматриваться как задача максимизации показателя рентабельности при ограничениях, наложенных на уровень устойчивости предприятия, факторов, воздействующих на нее, балансовое равновесие и максимально допустимый интервал изменения фактических показателей [5, с. 69]. Ограничения производимой продукции в 1941 г. в связи с перебазированием производственных мощностей на новую локацию и отсутствием поставок, необходимых для выпуска самолетов деталей, запасных частей и материалов, сказались на эффективности производства завода. Спад выпуска продукции в августе (рис. 2) обусловлен проведением эвакуации завода № 387 в Казань.



Рис. 1. Структура выпуска основной продукции завода № 387 за 1941 г.



Рис. 2. Динамика выпуска самолетов У-2 в 1941 г.

В основном все материалы и незавершенное производство было вывезено из Ленинграда. Это в значительной степени способствовало тому, что в сентябре месяце завод выполнил график Наркома [6]. Так как налаженная цепь поставок завода № 387 на момент начала Великой Отечественной войны (рис. 3) была полностью разорвана в связи с экстренной эвакуацией промышленности в тыловые районы СССР, руководство завода столкнулось с серьезной задачей снабжения производства в экстренных условиях. Спад выпуска продукции в октябре был обусловлен дефицитом ряда материалов и комплектующих, по которым и старые запасы иссякли. На смену поставщика аэролака первого покрытия московского завода № 36 была выявлена возможность изготовления аэролака на одном из заводов в Казани из местного сырья. Как только вопрос с аэролаком был решен, практически полностью прекратились поставки моторов заводом № 154 г. (Воронеж) [7]. Это обусловило снижение выпуска самолетов У-2.



Рис. 3. Цепь поставок завода № 387 до эвакуации

Поставщики Москвы, Ленинграда, южной части СССР прекратили осуществлять свою деятельность в связи с начавшимися событиями Великой Отечественной войны в этих частях страны. Так, в сентябре 1941 г. началась блокада Ленинграда, конец сентября – начало октября ознаменованы тяжелейшими боями за Москву. В октябре Воронеж оказывается в положении прифронтового города, линия фронта проходит в 100–120 км от него. По этой причине начинается эвакуация промышленных предприятий из Воронежа, в том числе завода № 154, отделившегося от авиазавода № 16 [8, с. 109]. Завод выпускал двигатели вплоть до эвакуации в город Андижан (Узбекистан) в октябре 1941 г. [9, с. 114].

Рационализация организации производства помогала решать такие задачи, как снижение себестоимости операций, улучшение качества и надежности боевых машин, повышение производительности и качества труда. «Инженер-технолог А.Н. Орлов совместно со стахановцем Бургановым заменили ручную обработку лонжеронов, рулей и элеронов фрезерованием, повысив нормы выработки до рекордных 957 процентов» [4, с. 65]. Работники завода боролись за снижение трудоемкости производства боевых машин, что можно отследить по приказам завода. «К маю 1943 года на заводе № 387 было внедрено более 600 предложений, которые подали 150 рационализаторов, с годовой экономией 3 миллиона 100 тысяч рублей» [4, с. 65]. Руководство завода стремилось максимально сократить издержки производства с применением следующих логистических инструментов:

- организация складского хозяйства;

- оптимизация внутрицехового транспортного хозяйства;
- рационализация использования оборудования, приспособлений, инструментов;
- снижение издержек остродефицитных материалов;
- устранение простоев технологических линий;
- совершенствование оборудования рабочего места;
- внедрение простой механизации.

Сокращение производственного цикла завода стало возможным благодаря перечисленным решениям, которые можно назвать инновационными и передовыми для промышленности военного времени. В довоенное время на производство одного самолета У-2 тратилось около 3000 ч, а за период войны производственный цикл самолета сократился до 1215 ч.

Важным аспектом организации производства самолетов являлось улучшение летно-технических качеств. Уже 1 января 1943 г. был представлен модернизированный самолет У-2. «У модернизированного самолета был увеличен угол обстрела, введены сбрасываемые кассеты для мелких бомб, изготовлены бронированные сиденья для летчика и штурмана (стрелка-бомбардира), облегчен бензобак, введены шаровые шарниры шасси, новая триммерная установка, приборная доска, выхлопная система с глушителем АКС-387 и ряд других усовершенствований» [4, с. 66]. Следует отметить, что конструкция модернизированного самолета включала деревянные детали, изготавливаемые по новой технологической схеме антисептирования деревянных агрегатов, подверженных увлажнению и загниванию.

Интересным фактом малярных и лакировочных работ является окраска боевых самолетов – сверху в зеленый, снизу – в голубой цвет.

Выше представлена структура выпуска основной продукции за 1941 год (см. рис. 1), в ходе военного времени завод несколько изменил номенклатуру поставляемых на фронт изделий (табл. 1).

Пролукция завола № 387	Годы				
продукция завода № 587	1942	1943	1944	1945	
Боеготовые самолеты	2135	2804	3041	2113	
Зимние лыжи	2736	3271	3634	3393	
Санитарные кассеты	348	437	346	73	
Кассеты АБКП-100	52	1075	234	-	
Бомбодержатели	25	350	63	-	
Шкворневые установки	-	305	160	-	
Бомбовые прицелы	-	1000	2855	-	

Таблица 1 Объем выпуска продукции заводом №387 в 1941-1945 гг., шт. [4]

В конце 1943 г. на заводе уже была запущена поточная линия сбора машин, что обусловило увеличение производительности труда и качества. Поточное производство сборки было организовано по следующим видам работ:

- сборка головной части фюзеляжа;

- отделка кабин пилотов;

- обтяжка крыльев;

- постановка шасси;

- сборка плоскостей и хвостового оперения (элероны, рули высоты, стабилизаторы, рули поворота, кили);

- стыковка моторной рамы;

- подвеска вооружения.

«К январю 1944 года на поток переводится сборка держателей, сборка всего фюзеляжа, изготовление баков, рассматриваются другие предложения по переводу на поточную сборку других изделий» [4, с. 67].

В августе 1944 г. самолет выпускался под обозначением По-2.

Несмотря на сложившиеся тяжелые условия, руководство в краткие сроки организовало процессы снабжения завода № 387 необходимыми деталями и комплектующими. Таким образом, можно сделать вывод о том, что совершенствование управления производственными процессами зависит от используемых комплектующих, эффективности способов их доставки и правильного (пропорционального) использования [10].

В цепи поставок завода № 387 существовало два канала сбыта во фронтовые авиационные части. Первый канал сбыта находился непосредственно на заводе, куда прибывали летчики за новыми боевыми машинами. На заводском аэродроме осуществлялся осмотр и проверка самолетов военпредами. Если замечаний не было, подписывался акт приема-передачи готового изделия, после чего экипажи улетали в них на фронт. «Второй вариант отправки осуществлялся летчиками-перегонщиками, которые были закреплены за предприятием» [4, с. 112]. Летчики перегоняли боевые машины в места базирования запасных авиационных полков, где в дальнейшем формировались строевые части с последующим вылетом в боевые части.

Итак, процесс эвакуации стратегически важных заводов ВПК оперативно осуществлялся в первые месяцы войны, что определялось целью скорейшего возобновления производства на нужды фронта. Большое количество оборонных предприятий было направлено в Поволжье, в частности в Казань.

Использование логистических принципов позволило показать гибкость производственных процессов завода № 387, что отразилось в весьма стремительном темпе эвакуации и налаживании производства на новом месте. План выпуска товарной продукции был выполнен заводом на 99,1 % [6]. Однако приведенные графики также дают представление о прямой зависимости динамики выпуска изготовляемой продукции от событий Великой Отечественной войны.

Из Ленинграда было эвакуировано ремесленное училище № 68, 270 учащихся которого эвакуировались в Казань вместе с 387-м заводом и также влились в его коллектив. Один из ремесленников, почетный ветеран, заслуженный машиностроитель России А.Д. Сахаров вспоминает: «В Казани нас всех поселили сначала на территории завода на деревянном складе. Мы участвовали в разгрузке оборудования, выполняли другие работы. А когда запустили производство, распределили по цехам и расселили по общежитиям. Одна группа ребят жила в помещении монастыря на Зилантовой горе, другая часть – в общежитии на улице Архангельской, а третья группа, куда входил и я, жила в подвале овощного магазина на улице Клары Цеткин» [4, с. 42]. Главный конструктор завода Григорий Бакшаев был трижды удостоен высоких государственных наград за работу по модернизации По-2 в годы Великой Отечественной войны.

За годы Великой Отечественной войны коллектив завода № 387 15 раз награждался переходящим Красным знаменем Государственного комитета обороны. 19 раз предприятию присуждались первые и вторые места во Всесоюзном социалистическом соревновании. В социалистическом соревновании среди предприятий ТАССР завод был десятикратным обладателем переходящего Красного знамени Совета народных комиссаров ТАССР и областного комитета ВКП(б).

Указом Президиума Верховного Совета СССР от 27 октября 1945 года Казанский завод № 387 Народного комиссариата авиационной промышленности был награжден орденом Трудового Красного Знамени – за образцовое выполнение заданий правительства по производству боевых самолетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Кабирова А.Ш. «Буду работать... по-стахановски»: Участие Татарстана в развитии военнопромышленного производства в годы Великой Отечественной войны // Военно-исторический журнал. 2009. № 12. С. 18–21
- 2. Государственный архив Республики Татарстан. Ф. Р-7483. Оп. 1. Д. 22. Л. 1–2.
- 3. Государственный архив Республики Татарстан. Р-7483. Оп. 1. Д. 22. Л. 5-6.
- 4. Сидоров М.Е. Оружие Победы по имени По-2. Казань: Идел-Пресс, 2015. 152 с.
- 5. Повышение эффективности производственной деятельности предприятия в условиях ресурсных ограничений / Р.З. Валиуллин [и др.] // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2017. № 3. С. 66–69.
- 6. Государственный архив Республики Татарстан. Ф. Р-7483. Оп. 1. Д. 20. Л. 6.
- 7. Государственный архив Республики Татарстан. Ф. Р-7483. Оп. 1. Д. 22.
- 8. История отечественной авиапромышленности. Серийное самолетостроение, 1910–2010 гг. / Под ред. Д.А. Соболева. М.: РУСАВИА, 2011. 432 с.
- 9. Котельников В.Р. Отечественные авиационные поршневые моторы (1910-2009). М.: Русский фонд содействия образованию и науке, 2010. 504 с.
- Надеждина М.Е., Мустафин И.Р., Шинкевич А.И. Логистические подходы к совершенствованию управления производственными процессами (на примере формового производства на ПАО «Кварт») // Социальные и технические сервисы: проблемы и пути развития: Сб. ст. по материалам 4-й Всерос. науч.-практ. конф. Н. Новгород: Мининский ун-т, 2018. С. 174–177.

Поступила в редколлегию 3.01.19

### EVACUATION AND ORGANIZATION OF INDUSTRIAL PRODUCTION DURING THE GREAT PATRIOTIC WAR BY THE EXAMPLE OF PLANT NO. 387

### I.A. Guzel'baeva and M.E. Nadezhdina

The purpose of this research is to study the history of the organization of production of the evacuated enterprise (for example, plant no. 387). The paper demonstrates the system of management decisions at the evacuated plant, namely, setting up production in a critical situation of a shortage of necessary resources; the completion of the links of the supply chain broken in the initial period of the Great Patriotic War. The use of new ways to improve the efficiency of production activities is considered. The simulated production-historical picture substantiates the idea of production flexibility, reveals the role of plant no. 387 in the military-industrial complex of the USSR and the victory.

Keywords: the Great Patriotic war, evacuation, plant no. 387, suppliers, industry, manufacturing organization.

**Гузельбаева Ирина Александровна** – ассистент (КГАСУ, Казань) E-mail: cherri-91@mail.ru

Надеждина Мария Евгеньевна – аспирант (КНИТУ, Казань) E-mail: frida333@mail.ru УДК 543.275.08:621.383.001.2

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ В РАБОЧЕМ ОБЪЕМЕ ИНДИКАТРИСОМЕТРА

### Л.Г. Кесель, И.А. Могилюк, Н.В. Толстая

Представлена методика расчета предельно допустимой освещенности в рабочем объеме индикатрисометра. Определены предельно допустимые значения освещенности рабочего объема идикатрисометра при известном времени нахождения частицы в освещенной области, радиусе частицы и длине волны.

Ключевые слова: аэрозоль, индикатрисометр, индикатриса рассеяния, предельно допустимая освещенность.

### Введение

Оптико-электронные приборы (ОЭП) во многих приложениях науки и техники позволяют реализовать принципиально новые возможности, недостижимые другими средствами [1]. Это связано с более высокой информационной емкостью оптических каналов по сравнению с приборами радиодиапазона и пространственным разрешением оптических локационных систем при возрастающей технологичности производства ОЭП и их миниатюризации. Для той аппаратуры, в которой не предусмотрена передача информации по волоконно-оптическому кабелю, важно знание закономерностей ослабления (рассеяния и поглощения) излучения в атмосфере и так называемых оптико-физических сигнатур природных и антропогенных объектов окружающей среды и их элементов [1].

В последние десятилетия для многих разработчиков ОЭС возникла необходимость освоения технологий сквозного моделирования создаваемых изделий с учетом режимов их работы в реальных погодных условиях замутненной естественными и антропогенными аэрозолями атмосфере.

Наиболее значимыми факторами, влияющими на результативность применения оптико-электронных систем (ОЭС), является аэрозоль с характерной для него динамикой оптических свойств в зависимости от погодных условий, времени и т.д. [2].

Важной составной частью аппаратурного обеспечения решаемой задачи является разработка устройств для измерения индикатрис рассеяния излучения аэрозольной средой – индикатрисометров [3, 4].

В данной работе представлена методика расчета предельно допустимой освещенности в рабочем объеме индикатрисометра. Величина предельно допустимой освещенности определяется нахождением предельно допустимой плотности энергии с целью выявления времени нахождения частицы в освещенной области в зависимости от радиуса частицы и длины волны. Это позволяет определить длительность импульса зондирования и параметры лазерного передатчика.

### Основная часть

Под действием оптического излучения температура частиц аэрозоля может подняться до таких пределов, при которых произойдет существенное изменение оптических параметров вещества аэрозоля. Поскольку данные об изменении оптических констант вещества дымовых аэрозолей от температуры практически отсутствуют, определим предельную плотность энергии  $H_{\rm np}$ , как такую, при которой происходит плавление твердых частиц аэрозоля.

Для некоторого момента времени t уравнение теплового баланса частицы имеет вид

$$\theta_{\rm usn} + \theta_{\rm usn.cp} = \theta_{\rm H} + \theta_{\rm t.o}, \qquad (1)$$

где  $\theta_{_{H3Л}} = \alpha P(t)$  – тепловой поток, поглощаемый частицей, за счет поглощения падающего излучения мощностью P(t);  $\alpha$  – коэффициент поглощения;  $\theta_{_{H3Л,CD}} = \alpha P_{_{CD}}$  – тепловой поток, поглощаемый частицей,

за счет поглощения излучения окружающих деталей прибора мощностью  $P_{cp}$ ;  $\theta_{H} = c\overline{m} \frac{\alpha T(t)}{dt}$  – тепло, идущее на нагревание частицы; c – теплоемкость;  $\overline{m}$  – масса частицы;  $\theta_{T,o} = \sigma T(t)$  – тепло, отдаваемое частицей окружающей среде;  $\sigma$  – коэффициент теплообмена; T(t) – разность температур частицы и среды в момент времени t.

Таким образом, имеем:

$$c\overline{m}\frac{dT(t)}{dt} + \sigma T(t) = \alpha P(t) + \alpha P_{\rm cp}.$$
(2)

В реальных условиях  $P_{cp} = 0$  и  $\sigma = 0$ , поэтому

$$\alpha P(t) = c\overline{m} \frac{dT(t)}{dt} \tag{3}$$

Поскольку в индикатрисометре частица освещается постоянным во времени потоком  $P_0$ , и при t = 0 T(t) = 0, уравнение (3) имеет решение:

$$c\overline{m}\Delta T = \alpha P_0 t , \qquad (4)$$

где  $\Delta T = T_{nn} - T_{oc}$ ;  $T_{nn}$  – температура плавления материала;  $T_{oc}$  – температура окружающей среды Предельная плотность энергии  $H_{np}$  имеет вид

$$H_{\rm np} = \frac{P_0 t_1}{S_{\rm q}} = E_0 t_1 \,, \tag{5}$$

где  $S_{\rm q}$  – площадь поперечного сечения частицы;  $t_1$  – время, через которое начнет плавиться частица;  $E_0$  – освещенность поперечного сечения рабочего объема.

В результате можем записать:

$$H_{\rm np} = \frac{c\Omega 4r(T_{\rm nn} - T_{\rm oc})}{3\alpha},\tag{6}$$

где  $\Omega$  – плотность материала частицы; r – радиус частицы;  $S_{\rm q} = \pi r^2$ ,  $\overline{m} = \frac{4}{3}\pi r^3\Omega$ .

Поскольку для пыледымовых (антропогенных) аэрозолей оптические константы имеют широкий диапазон значений, за среднее значение показателя преломления можно принять n = 1,5 при значении комплексной части «х» до 0,5. Чем выше значение «х», тем сильнее поглощает вещество.

Расчеты проводились для случая, когда комплексный показатель преломления *m* имеет значение:

$$m = 1,5-i0,5;$$
  
 $\alpha(\rho) \approx 1,2$  для  $\rho > 1;$  (7)  
 $\alpha(\rho) \approx \rho$  для  $\rho < 1,$ 

где  $\rho = \frac{2\pi r}{\lambda}$ .

Поскольку индикатрисометр должен работать с различного рода аэрозолями, то расчеты выполнялись для вещества с минимальным значением  $\Omega c (T_{nn} - T_{oc})$ .

Из ряда веществ, составляющих, например, дымовые аэрозоли, выбран KCl, для которого минимальное значение

$$\Omega c \left( T_{\rm nn} - T_{\rm oc} \right) = 10^9 \, \text{Дж/м}^2. \tag{8}$$

Подставив (7), (8) в (5), (6), получим

$$H_{np} = 8,26 \cdot 10^{8} r; \ \rho > 1;$$

$$H_{np} = 1.3 \cdot 10^{8} \lambda; \ \rho < 1;$$
(9)

63

$$E_{0} \leq 8,26 \cdot 10^{8} \frac{r}{t_{1}}; \ \rho > 1;$$

$$E_{0} \leq 1,3 \cdot 10^{8} \frac{\lambda}{t_{1}}; \ \rho < 1.$$
(10)

Таким образом, разработана методика расчета предельно допустимой освещенности в рабочем объеме индикатрисометра. Определены предельно допустимые значения освещенности  $E_0$  рабочего объема идикатрисометра, при известном времени нахождения частицы в освещенной области  $t_1$ , радиусе частицы *r* и длине волны  $\lambda$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Филиппов В.Л. Сигнатуры окружающей среды и моделирование входных воздействий на оптикоэлектронные системы дистанционного действия // Оптический журнал. 1993. № 9. С. 47–55.
- 2. Гусева А.Л. и др. Особенности расчета спектральной прозрачности атмосферы в условиях широкой вариативности исходных данных // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. № 4. С. 136–142.
- 3. Могилюк И.А., Кесель Л.Г., Толстая Н.В. Методика определения индикатрисы рассеяния аэрозольных сред на полидисперсной совокупности аэрозолей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. С. 84–88.
- 4. Могилюк И.А., Кесель Л.Г., Толстая Н.В. Методика определения индикатрисы рассеяния аэрозольных сред на отдельных частицах // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2016. № 4. С. 99–103.

Поступила в редколлегию 21.12.18

### A TECHNIQUE OF CALCULATING THE MAXIMUM ALLOWABLE ILLUMINATION IN THE WORKING VOLUME OF AN INDICATRIX METER

#### L.G. Kesel, I.A. Mogilyuk, and N.V. Tolstaya

The paper presents a technique of calculating the maximum allowable illumination in the working volume of an indicatrix meter. We determine the maximum allowable illumination values in the working volume of the indicatrix meter at a certain time of particles being in the illuminated region, the particle radius, and the wavelength.

Keywords: aerosol, indicatrix meter, scattering indicatrix, maximum allowable illumination.

**Кесель Людмила Григорьевна** – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: bak1951@yandex.ru

**Могилюк Игорь Антонович** – главный оптик (ГИПО, Казань) E-mail: gipo@telebit.ru

**Толстая Наталья Вадимовна** – канд. физ.-мат. наук (КГЭУ, Казань) E-mail: gipo@telebit.ru

### ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНДИКАТРИСОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДИКАТРИСЫ ОТДЕЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ

### Л.Г. Кесель, И.А. Могилюк, Н.В. Толстая

Выполнен анализ возможности повышения чувствительности индикатрисометра. Получены результаты, показывающие, что для повышения чувствительности индикатрисометра необходимо уменьшить пороговый поток приемника лучистой энергии, уменьшить время действия излучения на частицу аэрозоля, увеличить пропускание приемной системы, обоснованно выбирать точность регистрации индикатрисы.

Ключевые слова: аэрозоль, индикатрисометр, индикатриса рассеяния, предельно допустимая освещенность.

### Введение

Необходимым условием управления экологической ситуацией является наличие оперативной информации о состоянии природной среды и тенденциях ее изменения. Изменчивость параметров «оптической погоды» [1, 2] в широких пределах связана с наличием в естественной атмосфере аэрозолей, образующих природную дымку, мглу, туманы, и среды антропогенного происхождения – пыледымовые образования. Это определяет актуальность разработки средств измерения оптико-физических характеристик аэрозолей.

Одной из важных задач является анализ и обоснование оптимальных конструктивных решений при разработке оптико-электронных индикатрисометров – измерителей индикатрис рассеяния излучения аэрозолями [3, 4].

В данной работе выполнен анализ возможности повышения чувствительности индикатрисометра.

#### Основная часть

При выводе основного уравнения использовалось понятие световой трубки:

$$F_{\pi} = E_{\rm po} \Phi(\phi) w_2 \tau_2 \,, \tag{1}$$

где  $F_{\rm n}$  – лучистый поток, попадающий на рабочую площадку приемника;  $E_{\rm po}$  – освещенность поперечного сечения рабочего объема;  $\tau_2$  – пропускание приемной системы;  $\Phi(\phi)$  – значение абсолютной индикатрисы рассеяния для угла рассеяния  $\phi$ , которое можно определить по выражению (3) работы [2].

Для обеспечения надежной работы индикатрисометра необходимо выполнить условие

$$F_{\rm n\,min} \ge \gamma F_{\rm nop}\,,\tag{2}$$

где  $F_{n\min}$  – минимальное значение потока, попадающего на рабочую площадку приемника;  $F_{nop}$  – порог чувствительности приемника;  $\gamma$  – коэффициент запаса.

Таким образом, имеем из (1) и (2):

$$\gamma F_{\text{nop}} \le w_2 \tau_2 E_{\text{po}} \Phi_{\text{min}} , \qquad (3)$$

где  $\Phi_{\min}$  – минимальное значение индикатрисы рассеяния [2]:

$$\Phi_{\min}(r,\lambda) = 7,65 \cdot 10^{-3} \frac{\pi r^2 \rho^4}{1+\rho^4}.$$
(4)

Критерием чувствительности индикатрисометра в данном случае можно считать предельный минимальный радиус  $r_{\min}$  частицы аэрозоля, для которой возможно зарегистрировать индикатрису рассеяния с данной точностью  $\delta_{e}$ .

Для нахождения  $r_{\min}$  необходимо в (3) подставить максимально допустимые значения  $w_2$ ,  $E_{po}$ , а также минимально возможные значения  $\gamma$  и  $F_{nop}$  и разрешить неравенство относительно r при определенном значении длины волны излучения  $\lambda$ .

Величина у характеризует отношение сигнал/шум:

$$\gamma = \frac{F_{\pi}}{F_{\text{nop}}} \,. \tag{5}$$

Поскольку  $F_{\pi}$  и  $F_{nop}$  – величины случайные, то сигнал с приемника будет пропорционален величине  $F_{\Sigma}$ :

$$F_{\Sigma} = \sqrt{F_{\Pi}^2 + F_{\Pi op}^2} \; .$$

Таким образом, относительная погрешность составит величину

$$\delta_c = \frac{F_{\Sigma} - F_{\Pi}}{F_{\Pi}} = \sqrt{1 + \frac{1}{\gamma^2}} - 1.$$
 (6)

Поскольку  $\gamma > 1$ , то

$$\delta_c \approx \frac{1}{2\gamma^2} \,. \tag{7}$$

Обозначим  $\mu = \frac{1}{\lambda}$ , тогда  $\delta_c = \frac{\mu^2}{2}$ .

Конечные значения апертурных углов приемной  $\overline{\alpha_2}$  и осветительной системы  $\alpha_1$  приводят к двум видам ошибок:  $\delta_p$  и  $\delta_n$ .

Если принять, что апертуры согласованы, т.е.  $\overline{\alpha} = \overline{\alpha_1} = \overline{\alpha_2}$ , получаем:

$$\delta_p = \overline{\alpha}^2 50 ; \qquad (8)$$

$$\delta_n = \alpha \,. \tag{9}$$

Суммарную ошибку регистрации индикатрисы запишем как

$$\delta_{\Sigma} = \delta_c + \delta_p + \delta_n \tag{10}$$

или

$$\delta_{\Sigma} = \overline{\alpha} + 50\overline{\alpha}^2 + \frac{\mu^2}{2}.$$

Поскольку величины  $\alpha$  и  $\mu$  неизвестны, необходимо их выбрать так, чтобы при постоянном значении  $F_{nop}$  согласно (3)  $\delta_{\Sigma}$  было минимальным.

Известно, что

$$F_{\text{nop}} \approx \frac{\overline{\alpha_1}^2 \overline{\alpha_2}^2}{\gamma} = \overline{\alpha}^4 \mu$$

Чтобы сохранить  $F_{\text{пор}} = \text{const}$ , необходимо иметь  $\alpha^{-4} \mu = C_o = \text{const}$ . Обозначим  $x = \frac{\alpha}{\mu}$ , тогда

$$\mu = \left(\frac{C_o}{x^4}\right)^{1/5}$$

или

$$\delta_{\Sigma} = \frac{C_o^{r/5}}{2} \left( \frac{2}{C_o^{1/5}} x^{9/5} + 100x^2 + 1 \right).$$

Экстремальное значение:

$$\frac{d\left(\delta_{\Sigma}\right)}{dx}=0.$$

После дифференцирования

$$\frac{x_o^{9/5}}{C_o^{1/5}} + 100x_o^2 - 4 = 0.$$
<sup>(11)</sup>

Поскольку  $x_o^{\frac{9}{5}} \approx x_o^2$  получаем  $x_o \approx \frac{2}{\sqrt{100 + \frac{1}{C_o^{1/5}}}}$ .

Вычисления показывают, что  $C_o^{-1/5} \approx 18$ . Таким образом,  $x_o \approx 0,184$ , так как  $\frac{d^2(\delta_{\Sigma})}{dx^2}\Big|_{x=x_o} > 0$ ; ( $x_o$  co-

ответствует минимуму), тогда  $\mu = \frac{\overline{\alpha}}{x_o} = 5,42\overline{\alpha}, \overline{\alpha}$  найдем из соотношения

$$\delta_{\Sigma} = \overline{\alpha} + 64 / 75 \overline{\alpha}^2, \qquad (12)$$

или

$$\overline{\alpha} = \frac{\sqrt{1+259\delta_{\Sigma}}-1}{125/5}.$$

Поскольку  $\delta_{\Sigma} \approx 0,1$ , тогда

$$\overline{\alpha} \le 0,104\delta_{\Sigma}^{-1/2}, \qquad (13)$$

а также

$$\delta_c \approx \frac{\delta_{\Sigma}}{6,25},\tag{14}$$

или

$$\gamma \ge \frac{1,77}{\sqrt{\delta_{\Sigma}}} \,. \tag{15}$$

Предварительные расчеты показали, что для  $\lambda = (0,63 \div 10,6)10^{-6} M$ ,  $\rho_{\min} = \frac{2\pi r_{\min}}{\lambda} >> 1$ , поэтому освещенность рабочего объема определяется выражением [5]

$$E_o \le 8,26 \cdot 10^8 \, \frac{r_{\min}}{t_1} \,. \tag{16}$$

Подставив в (3) соответственно (13), (15), (16), получаем:

$$r_{\min} \ge \sqrt[3]{\frac{F_{\text{nop}}t_1}{1,22 \cdot 10^5 \delta_g^{3/2} \tau_2}},$$
(17)

где  $\,\delta_g\,$  – допустимая суммарная ошибка, т.е.  $\,\delta_{\Sigma} \leq \delta_g$  .

#### Заключение

Приведенные результаты показывают, что для повышения чувствительности индикатрисометра необходимо следующее.

1. Уменьшить пороговый поток приемника лучистой энергии, т. е. выбирать высокочувствительный приемник.

2. Уменьшить время действия излучения на частицу аэрозоля.

3. Увеличивать пропускание приемной системы.

ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 1

4. Обоснованно выбирать точность регистрации индикатрисы, поскольку уменьшение ошибок резко снижает чувствительность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Филиппов В.Л. Сигнатуры окружающей среды и моделирование входных воздействий на оптикоэлектронные системы дистанционного действия // Оптический журнал. 1993. № 9. С. 47–55.
- 2. Гусева А.Л. и др. Особенности расчета спектральной прозрачности атмосферы в условиях широкой вариативности исходных данных // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. № 4. С. 136–142.
- 3. *Могилюк И.А., Кесель Л.Г., Толстая Н.В.* Методика определения индикатрисы рассеяния аэрозольных сред на полидисперсной совокупности аэрозолей // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. С. 84–88.
- 4. Могилюк И.А., Кесель Л.Г., Толстая Н.В. Методика определения индикатрисы рассеяния аэрозольных сред на отдельных частицах // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2016. № 4. С. 99–103.
- 5. Могилюк И.А., Кесель Л.Г., Толстая Н.В. Методика расчета предельно допустимой освещенности в рабочем объеме индикатрисометра // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 1. С. 70–72.

Поступила в редколлегию 21.12.18

## INCREASING THE SENSITIVITY OF AN INDICATRIX METER TO MEASURE THE INDICATRIX OF INDIVIDUAL PARTICLES

L.G. Kesel', I.A. Mogilyuk, and N.V. Tolstaya

In this paper, we analyze the possibility of increasing the sensitivity of the indicatrix meter. The results obtained show that for increasing the sensitivity of the indicatrix meter, it should be necessary to reduce the threshold flow of the radiant energy receiver, to reduce the duration of radiation on the aerosol particle, to increase the transmission of the receiving system, and to select reasonably the check accuracy.

Keywords: aerosol, indicatrix meter, scattering indicatrix, maximum allowable illumination.

**Кесель Людмила Григорьевна** – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: bak1951@yandex.ru

**Могилюк Игорь Антонович** – главный оптик (ГИПО, Казань) E-mail: gipo@telebit.ru

**Толстая Наталья Вадимовна** – канд. физ.-мат. наук (КГЭУ, Казань) E-mail: gipo@telebit.ru

## СИСТЕМА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА ДЛЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ «БОДРОСТЬ – СОН – НАПРЯЖЕННОСТЬ» ВОДИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

### Т.Ф. Щербакова, Э.Р. Галимзянов, В.А. Щербакова

Рассмотрены методы определения состояния водителя «бодрость – сон – напряженность» на основе анализа электрокардиосигнала. Описаны особенности применения указанных методов при обработке электрокардиосигналов людей, имеющих нарушения синусового ритма. Представлены результаты расчета индекса напряжения и спектрального анализа кардиоинтерваллограмм пациентов с брадикардией и тахикардией. Предлагается разработать новый многопороговый метод определения состояния водителя «бодрость – сон – напряженность» на основе полученных результатов.

#### Ключевые слова: электрокардиосигнал, вариабельность сердечного ритма, кардиоинтервалограмма, индекс напряжения.

#### Введение

В современном мире актуальна проблема хронической усталости и сильного утомления в связи с ростом нагрузки и стресса населения. Стресс и хроническая усталость зачастую становятся факторами риска дорожно-транспортных происшествий на дорогах. Один из таких факторов – засыпание за рулем транспортных средств.

Мировая статистика свидетельствует о том, что в среднем около 5 % дорожно-транспортных происшествий со смертельным исходом происходит из-за засыпания водителя за рулем. Длительные поездки по привычной трассе, ровной и прямой дороге, отсутствие других транспортных средств и специального покрытия, создающего шум и вибрацию при съезде на обочину или встречную полосу способствуют потере внимания и засыпанию. Именно из-за этого задача по предотвращению засыпания человека, который является оператором в системе «человек – машина» приобретает большую актуальность.

Благодаря тому что развитие телекоммуникационных систем улучшается с каждым днем, появляются новые способы по предупреждению и предотвращению данной проблемы. Существуют различные системы, которые оценивают состояние водителя, могут передавать информацию о его состоянии в центр наблюдения и включать сигнал тревоги в случае необходимости. Задача такой телекоммуникационной системы – передать информацию о состоянии водителя. Определяется с наименьшей погрешностью переход от состояния бодрствования к состоянию дремоты с выдачей сигнала тревоги, тем самым предотвращается последующее засыпание и, следовательно, несчастный случай.

### Методы анализа состояния «бодрость – сон – напряженность»

Существуют несколько видов методик для контроля бодрствования водителей. Физиологические методики основываются на анализе электрофизиологических показателей водителя. Наиболее точным и надежным методом является анализ электроэнцефалографических сигналов. Однако при этом методе возникают сложности со съемом информации с коры головного мозга. Поэтому предпочтительней является анализ электрокардиографических сигналов (ЭКС).

Рассмотрим анализ ЭКС в задачах мониторинга состояния водителя в системах контроля бодрствования. Анализ состояния водителя проведем по параметру ЭКС, а именно по частоте сердечных сокращений (ЧСС). Этот параметр будет определяется по временным положениям вершин R-пиков.

При засыпании пульс человека начинает снижаться, появляются признаки синусовой брадикардии (ЧСС < 60 уд./мин), а при стрессовом состоянии симпатическая нервная система человека активизируется, сердце работает интенсивнее, наблюдаются признаки синусовой тахикардии (ЧСС > 100 уд./мин). Однако данный порог может отличаться от пороговых значений для людей с различными патологиями или аритмиями, поэтому необходимо осуществлять контроль дополнительных параметров ЭКС. В данной работе приводятся исследования показателей вариабельности ритма сердца для различных уровней бодрствования, а также исследуются электрокардиосигналы людей с отклонениями от нормы (брадикардия и тахикардия). Данные показатели, получаемые при анализе ЭКС, предлагается использовать для диагностики состояния дремоты и стресса.

Для определения уровня бодрствования будем использовать показатели вариабельности сердечного ритма (ВСР) [1, 2]. ВСР – это изменчивость различных параметров сердца в ответ на воздействие каких-либо внешних или внутренних факторов, которая может проявляться в изменении длительности кардиоинтервалов от цикла к циклу. ВСР дает возможность оценить степень напряженности или тонуса симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы. Исходным материалом для анализа ВСР являются непродолжительные одноканальные записи ЭКС. Данные о ВСР будем получать при анализе кардиоинтерваллограмм (КИГ).

Для построения КИГ по ЭКС измеряют RR-интервалы, которые отражают частоту сердечных сокращений. RR-интервал – это время в секундах между двумя соседними R пиками ЭКС, которое соответствует одному биению сердца (кардиоциклу). Далее строится зависимость длительности RR-интервалов от момента времени их появления на ЭКС. Следующий этап анализа заключается в построении огибающей КИГ и вычисление ее амплитудно-частотного спектра. При этом принято делить частоты спектра на следующие диапазоны: низкочастотный (LF) – 0,04...0,15 Гц и высокочастотный (HF) – 0,15...0,4 Гц [3]. Затем вычисляется отношение низкочастотной части спектра к высокочастотной (LF/HF).

Подробный алгоритм расчета ЧСС и показателей ВСР приведен в работе [4].

Для здорового человека нормальное отношение LF/HF составляет 1,5...2, в случае состояния возбуждения показатель LF/HF больше двух, а при сильном расслаблении – менее единицы.

При построении КИГ анализируют ЭКС длительностью 5 мин, поэтому первые 5 мин работы системы отводятся на накопление элементов ряда. Формирование КИГ по мере поступления отсчетов ЭКС происходит постоянно. Для динамического определения состояния водителя ЭКС анализируется эпохами длительностью 5 мин (300 с) со сдвигом 10 с (перекрытие эпох составляет 290 с / 300 с = 97 %) (рис. 1).



Рис. 1. Иллюстрация сдвига интервала анализа ЭКС во времени

Таким образом, по амплитудно-частотному спектру огибающей КИГ находится отношение LF/HF. Далее производится классификация уровня бодрствования водителя по значениям полученных показателей. В случае критических значений показателей активизируется система тревоги.

Для анализа ВСР также применяют метод вариационной пульсометрии, который заключается в расчете значения стресс-индекса (индекс напряжения) построением гистограммы – кривой распределения кардиоинтервалов как случайных величин. Основание гистограммы (вариационный размах) – это разность между максимальным и минимальным кардиоинтервалом; по оси абсцисс – длительность кардиоинтервалов, по оси ординат – процент числа кардиоинтервалов с заданной длительностью. Традиционно при построении гистограммы кардиоинтервалы группируют в диапазоне 0,4...1,3 с с интервалом в 0,05 с.

Индекс напряжения (ИН) – это параметр, показывающий, какой тип вегетативной нервной системы преобладает у человека – симпатический или парасимпатический:

$$\mathbf{HH} = \frac{Amo}{2MoMxDMn} \,,$$

где *Мо* – это мода (наиболее вероятная длительность); *Ато* – амплитуда моды (число кардиоинтервалов, соответствующих значению моды, в процентах к объему выборки); *МхDMn* – вариационный размах (разность между максимальным и минимальным значением длительности RR-интервалов).

В норме ИН составляет 50–150 у.е., меньше 50 у.е. – состояние расслабления, больше 150 у.е. – состояние стресса.

#### Брадикардия и ее показатели вариабельности ритма

В рамках данного исследования был проведен анализ изменения показателей ЭКС во времени. В качестве основы были выбраны записи сигналов с нормальным синусовым ритмом ресурса www.physionet.org. Значения показателей обрабатывались с помощью Cygwin с пакетом функций WaveForm DataBase Toolbox, Kubios HRV и MathLab. Результаты показали, что во время бодрствования показатели ЧСС находятся в пределах нормы [5].

На рис. 2 представлен пример кардиоинтервалограммы человека с нормальным сердечным ритмом (ЧСС = 85 уд./мин.).



Рис. 2. Кардиоинтервалограмма человека с нормальным синусовым ритмом (ЧСС = 85 уд.мин.)

На рис. 3 приведен пример огибающей кардиоинтервалограммы, полученной при анализе ЭКС здорового человека.



Рис. 3. Огибающая КИГ сигнала с нормальным синусовым ритмом

При переходе человека к состоянию дремоты меняется размах длительностей RR-интервалов и временное положение их максимумов и минимумов. Все это отражается в изменении спектра КИГ, а именно, возрастают амплитуды спектральных составляющих правой части спектра.

Наше исследование направлено на определение значения отношения LF/HF и порога для людей с брадикардией, которым по медицинским показаниям не запрещено водить транспортное средство. Логично, что тенденция к уменьшению значения отношения LF/HF при переходе человека в состояние дремоты сохранится и для людей с брадикардией. Однако значения отношения будут другими, так как изменяется форма спектра КИГ. В связи с этим изменится и пороговое значение отношения LF/HF для этого случая, что и требуется найти в поставленной задаче.

Были проанализированы ЭКС двух пациентов с брадикардией, построены КИГ и получены их спектры. Примеры спектров приведены на рис. 4.

Далее для каждого спектра были вычислены отношения LF/HF, значения которых оказались менее 1,5, хотя эти пациенты находились в состоянии бодрствования. Значит, для людей с брадикардией пороговое значение отношения LF/HF, по которому определяется переход к состоянию дремоты, должно быть меньше, чем для людей с нормальным сердечным ритмом. Согласно вычислениям, полученным с помощью программы Kubios HRV, для первого пациента отношение LF/HF составило 0,97 (ЧСС = 48 уд./мин.). Для второго пациента отношение LF/HF равно 1,41 (ЧСС = 55 уд./мин.). Отсюда следует, что для людей с разной степенью выраженности брадикардии наблюдаются различные значения указанного отношения. Это значит, что могут определяться несколько пороговых значений отношения LF/HF для определения момента наступления дремоты для людей с различной степенью брадикардии. В связи с этим необходи-

ма разработка многопороговой системы для определения перехода из состояния бодрости в состояние дремоты для людей с брадикардией.



Рис. 4. Спектр КИГ первого (а) и второго пациента (б) с брадикардией

Далее по КИГ для анализируемых сигналов были построены гистограммы (по оси ординат – количество RR-интервалов заданной длительности, по оси абсцисс – длительность RR-интервала) и рассчитан ИН. Примеры КИГ и гистограмм приведены на рис. 5.



Рис. 5. КИГ и гистограмма первого (а) и второго (б) пациента с брадикардией
В норме значение ИН должно быть в пределах 50...150 у.е., если ИН меньше 50, это означает, что человек находится в состоянии расслабления, если больше 150 – в состоянии стресса.

Полученные значения ИН для первого и второго пациентов равны 30,49 у.е. и 69,3 у.е, поэтому можно предположить, что пороговые значения ИН для определения состояния расслабления у людей с брадикардией должны быть ниже, чем для здоровых людей.

Аналогичный анализ ЭКС был проведен для пациентов с тахикардией. Для них были построены КИГ, вычислены спектры огибающих КИГ (рис. 6) и определены значения LF/HF и ИН. Согласно вычислениям, полученным с помощью программы Kubios HRV, значения отношения LF/HF составили 2,13 (ЧСС = 129 уд./мин.) и 2,27 (ЧСС = 97 уд./мин.).



Рис. 6. Спектр КИГ первого (а) и второго (б) пациента с тахикардией

Далее по КИГ для анализируемых сигналов были построены гистограммы (рис. 7) и рассчитан ИН. Значение ИН для одного пациента составило 192 у.е., для другого – 170 у.е., хотя пациенты не находились в состоянии стресса. Таким образом, пороговые значения ИН и отношения LF/HF для определения состояния расслабления у людей с тахикардией должны быть выше, чем для здоровых людей.



Рис. 7. Гистограмма первого (а) и второго (б) пациента с тахикардией

Кроме того, значение отношения LF/HF и его отклонение от нормы необходимо отслеживать непрерывно, так как человек переходит к состоянию сна в неопределенный момент времени и достаточно быстро. Предлагается проводить спектральный анализ на перекрывающихся во времени участках – эпохах, длина которых составляет 5 мин, а результаты исследований информативны при интервале перекрытия в 10 с. Таким образом, система будет выдавать первые результаты анализа состояния человека и при необходимости сигнал тревоги через 5 мин после начала работы, а далее – через каждые 10 с, что обеспечивает непрерывный и точный характер мониторирования состояния водителя.

#### Заключение

На основании проведенных экспериментов можно заключить, что показатели, используемые для анализа состояния «бодрость – сон – напряженность» по ЭКС, существенно отличаются для людей с брадикардией, тахикардией и здоровых людей. В связи с этим возникает необходимость введения новых пороговых значений индекса напряжения и отношения LF/HF для достоверного определения состояния водителей транспортных средств, имеющих указанные заболевания. Для определения пороговых значений перечисленных параметров в дальнейшем планируется провести анализ большего количества сигналов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Яблучанский Н.И., Мартыненко А.В. Вариабельность сердечного ритма. В помощь практическому врачу. Харьков: Основа, 2010. 131 с.
- 2. Алейникова Т.В. Вариабельность сердечного ритма (обзор литературы) // Проблемы здоровья и экологии. 2012. Вып. 1 (31). С. 1–23.
- 3. Баевский Р.М. и др. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем // Вестник аритмологии. 2002. № 24. С. 65–87.
- 4. Парин В.В. и др. Космическая кардиология. Л.: Медицина, 1967. 206 с.
- 5. *Sherbakova T.F., Osipova O.S.* The analysis of an electrocardiosignal in a system of data transmission in control office // Proc. of the 10th Anniversary international conference of antenna theory and techniques, Kharkiv, 2015. P. 407–408.

Поступила в редколлегию 24.12.18

# A SYSTEM OF MULTIPARAMETER ANALYSIS OF THE ELECTROCARDIOSIGNAL FOR DETERMINING THE DRIVER'S "WAKEFULNESS – SLEEP – ALERTNESS" CONDITION

## T.F. Sherbakova, E.R. Galimzyanov, and V.A. Shcherbakova

The paper considers the methods of processing electrocardiosignals for determining the driver's "wakefulness – sleep – alertness" condition. The paper describes the special features of applying such methods in ECG signal processing for persons with sinus arrhythmias. The results of the stress index calculation and spectral analysis of cardiointervalogramms for patients with bradycardia and tachycardia are presented. We propose a new multithreshold method for determining the driver's "wakefulness – sleep – alertness" condition based on the results obtained.

Keywords: electrocardiosignal, heart rate variability, cardiointervalogramm, stress index.

**Щербакова Татьяна Филипповна** – доцент (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: tfscherbakova@kai.ru

Галимзянов Эмиль Рустэмович – старший преподаватель (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: emil kai@bk.ru

E-man. emin\_kan@bk.ru

**Щербакова Владислава Александровна** – студент (СЗГМУ, Санкт-Петербург) E-mail: tfscherbakova@kai.ru

# МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВИХРЕВОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ ДОЗВУКОВОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

#### Е.С. Ефремова, Р.В. Солдаткин

Рассмотрены особенности построения и алгоритмы обработки информации вихревой системы воздушных сигналов дозвукового летательного аппарата. Приводится динамическая характеристика, получены модели динамических погрешностей измерительных каналов при детерминированных и случайных воздействиях.

Ключевые слова: летательный аппарат, воздушные сигналы, измерение, вихревая система, измерительные каналы, динамические погрешности, детерминированные и случайные воздействия.

#### Введение

При пилотировании и решении задач обеспечения безопасности полета летательных аппаратов (ЛА) в пределах атмосферы необходима достоверная информация об истинной воздушной и приборной скорости, аэродинамических углах атаки и скольжения, числе Маха и барометрической высоте, о других воздушных сигналах, определяющих аэродинамику и динамику движения относительно окружающей воздушной среды [1, 2]. Современные средства измерения воздушных сигналов реализуют аэродинамический, аэрометрический и флюгерные методы и построены на основе приемников воздушных давлений, приемников температуры торможения, флюгерных или других датчиков аэродинамических углов, устанавливаемых на фюзеляже и вынесенных в набегающий воздушный поток за пределы пограничного слоя ЛА [3, 4]. При этом восприятие, выделение, передача и преобразование первичных амплитудных информативных сигналов в виде давлений, перепадов давлений, сопротивлений, напряжений, токов и др. связано с появлением аддитивных и мультипликативных погрешностей, снижающих точность измерения воздушных сигналов [3, 5].

#### Особенности вихревой системы воздушных сигналов дозвукового ЛА

Возможность достижения меньших потерь информации при восприятии, выделении, передаче, преобразовании и обработке частотно-временных первичных информативных сигналов, формируемых с помощью одного неподвижного многофункционального приемника первичной информации, естественная возможность получения выходных сигналов в цифровой форме определяют перспективность системы воздушных сигналов дозвукового ЛА на основе вихревого метода [6–8].

В основу построения вихревой системы воздушных сигналов (рисунок) положен оригинальный вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости [7].

Датчик содержит две установленные в набегающем потоке неподвижные клиновидные пирамиды I, основания которых расположены встречно потоку под углом  $2\phi_0 = 90^\circ$ . При обтекании клиновидных пирамид с их оснований происходит периодический срыв потока с образованием вихревых дорожек Кармана с частотами, пропорциональными истинной воздушной скорости и зависящими от угла направления набегающего потока.

Пульсации давлений на тыльных поверхностях пирамид, возникающих при периодических срывах потока с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , регистрируются пневмоэлектрическими преобразователями 2, выходы которых поступают на входы устройства регистрации частот 3, формирующих сигналы с частотами  $f_1$  и  $f_2$  вихреобразования. Сигналы с частотами  $f_1$  и  $f_2$  поступают на вход устройства обработки 4, выполненного в виде вычислителя, на выходе которого формируются выходные сигналы по аэродинамическому углу  $\alpha$  и истинной воздушной скорости  $V_{\rm B}$  в соответствии с уравнениями [7, 8]

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2}; \ V_{\scriptscriptstyle B} = \frac{1}{\sqrt{2} \operatorname{Sh}} \frac{f_1 f_2}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}} \,.$$
(1)

где Sh – число Струхаля клиновидной пирамиды.



Для расширения функциональных возможностей вихревого датчика и обеспечения измерения других воздушных сигналов дозвукового ЛА – барометрической высоты H, температуры наружного воздуха  $T_H$  и плотности  $\rho_H$  на высоте полета H, приборной скорости  $V_{np}$  и числа Маха М – на верхней скользящей поверхности верхнего струевыпрямителя 5 установлено отверстие-приемник 6 для восприятия статического давления  $P_H$  набегающего воздушного потока, которое через пневмопровод 7 связано со входом пневмоэлектрического преобразователя (датчика) 8 абсолютного давления преимущественно с частотным или цифровым выходом [9].

Выход пневмоэлектрического преобразователя (датчика) подключен ко входу вычислителя, формирующего кроме истинной воздушной скорости  $V_{\rm B}$  и аэродинамического угла  $\alpha$  и другие воздушные сигналы в соответствии с алгоритмами вида [9, 10]

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left(\frac{P_H}{P_0}\right)^{\tau R} \right];$$

$$V_{\rm np} = \sqrt{2gRT_0} \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[ \left(1 + \frac{\rho_0 T_0}{2P_0^2} \frac{P_H}{T_H} V_{\rm B}^2\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right];$$

$$M = \sqrt{\frac{2}{k-1}} \left[ \left(1 + \frac{\rho_0 T_0}{2P_0 T_H} V_{\rm B}^2\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right];$$

$$T_H = \frac{V_{\rm B}^2}{2gR\left(\frac{k}{k-1}\right) \left[ \left(1 + \frac{\rho_0 T_0}{2P_0} \frac{V_{\rm B}^2}{T_H}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right];$$

$$\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_0}{P_0 T_H},$$
(2)

где  $P_0$ ,  $T_0$  и  $\rho_0$  – значения абсолютного давления, абсолютной температуры и плотности воздуха на высоте H = 0 стандартной атмосферы;  $\tau$  – температурный градиент; R – газовая постоянная воздуха; g – ускорение свободного падения; k – показатель адиабаты воздуха.

Как и для традиционных систем воздушных сигналов, для рассматриваемой вихревой системы характерны методические и инструментальные погрешности, исследование которых проводится в работах [11, 12]. Далее проводятся исследования динамических погрешностей измерительных каналов вихревой системы воздушных сигналов.

#### Модели динамических характеристик измерительных каналов вихревой системы воздушных сигналов

Динамические погрешности системы воздушных сигналов дозвукового ЛА на основе вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости имеют место на неустановившихся режимах измерения, а также при воздействии внешних помех.

Основной причиной собственных динамических погрешностей измерительных каналов системы являются инерционность и динамические свойства канала формирования, выделения и передачи частотно-временных информативных сигналов, их преобразования и обработки. Вынужденные динамические погрешности измерительных каналов системы обусловлены в основном внешними воздействиями в виде турбулентности атмосферы и других возмущений набегающего воздушного потока.

Методы оценки динамических погрешностей измерительных устройств достаточно полно рассмотрены в работах [13, 14]. Далее рассматриваются особенности их применения в измерительных каналах система воздушных сигналов дозвукового ЛА на основе вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

Динамические свойства линейных измерительно-вычислительных систем принято характеризовать передаточными функциями – операторными чувствительностями используемых измерительных преобразователей первичных информативных сигналов, элементов их аналого-цифрового преобразования, обработки и формирования выходных сигналов [14].

В исследуемой системе воздушных сигналов первичными информативными сигналами вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости являются частоты пульсаций давлений за клиновидными пирамидами, а канала измерения барометрической высоты – абсолютное давление, воспринимаемое на поверхности струевыпрямителя вихревого датчика.

С учетом инерционных свойств элементов аналого-цифрового преобразования, обработки и формирования выходных сигналов передаточную функцию – операторную чувствительность измерительных каналов системы воздушных сигналов ЛА на основе вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости – можно представить в виде

$$W(p) = \frac{e^{-\tau_3 p}}{\left(\tau_1 \tau_2 p^2 + \tau_2 p + 1\right) \left(\tau_n p + 1\right)},$$
(3)

где  $\tau_3$  – время чистого запаздывания, связанного с задержкой выдачи выходных сигналов системы;  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – постоянные времени схемы выделения и передачи частот вихреобразования;  $\tau_{\pi}$  – постоянная времени пневмоэлектрического преобразователя частот пульсаций давления за клинообразными пирамидами или датчика абсолютного давления, воспринимаемого на скользящей поверхности струевыпрямителя.

# Модели динамических погрешностей вихревой системы воздушных сигналов при детерминированных и случайных воздействиях

В общем виде выражение для абсолютной динамической погрешности измерительного канала системы воздушных сигналов дозвукового ЛА на основе вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости можно представить в операторной форме, например, по каналу истиной воздушной скорости

$$\Delta V_{\rm B}(p) = W(p)V_{\rm B}(p) - V_{\rm B}(p) + W(p)\xi_{\rm B}(p) = = [W(p) - 1]V_{\rm B}(p) + W(p)\xi_{\rm B}(p) = \Delta V_{\rm BC}(p) + \Delta V_{\rm BB}(p),$$
(4)

где  $\Delta V_{\rm BC}(p) = [W(p)-1]V_{\rm B}(p)$  – изображение собственной динамической погрешности канала истинной воздушной скорости;  $\Delta V_{\rm BB}(p) = W(p)\xi_{\rm B}(p)$  – изображение вынужденной динамической погрешности, обусловленной внешним возмущением, наложенным на воздушный поток, набегающий на неподвижный многофункциональный приемник первичной информации системы воздушных сигналов на основе вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости;  $\xi_{\rm B}(p)$  – изображение эк-

вивалентного внешнего возмущения; *V*(*p*) – изображение входного сигнала истинной воздушной скорости.

В зависимости от преобладающего характера изменения во времени измеряемого высотноскоростного параметра при анализе собственной динамической погрешности измерительных каналов исследуемой системы используются различные типовые входные воздействия, характеризующие наиболее неблагоприятные условия их работы, которые достаточно точно описываются детерминированными функциями времени.

На практике для оценки динамической точности бортовых измерительных каналов в качестве типовых входных воздействий используют скачкообразные изменения входного сигнала в виде «единичных» скачков, а также изменение контролируемого параметра с постоянной скоростью. При заданном законе изменения входного сигнала собственная динамическая погрешность измерительных каналов исследуемой системы воздушных сигналов при известной передаточной функции – операторной чувствительности W(p) – определяется через обратное преобразование Лапласа, например для канала истинной воздушной скорости в виде

$$\Delta V_{\rm BC}(t) = L^{-1}\left\{ \left[ W(p) - 1 \right] V_{\rm B}(p) \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{e^{-\tau_3 p}}{\tau_1 \tau_2 \tau_{\rm m} p^3 + \tau_{\rm m} \left(\tau_1 + \tau_2\right) p^2 + \tau_{\rm m} p + 1} V_{\rm B}(p) \right\}.$$
(5)

При этом характер изменения собственной динамической погрешности измерительного канала, например, канала истинной воздушной скорости определяется видом корней характеристического уравнения передаточной функции – операторной чувствительности W(p).

Если известны корни характеристического уравнения W(p), например один действительный отрицательный  $p_1 = -k_1$  и два комплексно-сопряженных  $p_{2,3} = -k_{2,3} \pm j\omega_0$ , то при скачкообразном изменении истинной воздушной скорости  $V_{\rm B}(t) = V_{\rm B0} \, l[t]$  выражение для собственной динамической погрешности канала истинной воздушной скорости будет иметь вид

$$\Delta V_{\rm BC}(t) = -V_{\rm B0} \left\{ \frac{k_2^2 + \omega_0^2}{\left(k_1 - k_2\right)^2 + \omega_0^2} e^{-k_1 t} + \left[ \frac{k_1 \left(k_1 - 2k_2\right)}{\left(k_1 - k_2\right)^2 + \omega_0^2} \cos \omega_0 t - \frac{k_1 \left(\omega_0^2 - k_2^2 - k_1 k_2\right)}{\omega_0 \left[\left(k_1 - k_2\right)^2 + \omega_0^2\right]} \sin \omega_0 t \right] e^{-k_2 t} \right\}.$$
(6)

Как видно из соотношения (6), при скачкообразном изменении истинной воздушной скорости и других воздушных сигналов исследуемой системы в установившемся режиме собственная динамическая погрешность близка к нулю.

При сложных законах изменения входного сигнала исследуемой системы для определения собственной динамической погрешности измерительных каналов, например канала истинной воздушной скорости, можно использовать так называемые коэффициенты динамической погрешности  $c_0, c_1, c_2, ..., c_n$ , т.е.

$$\Delta V_{\rm BC}(t) = c_0 V_{\rm B}(t) + c_1 \frac{dV_{\rm B}}{dt} + c_2 \frac{d^2 V_{\rm B}}{dt^2} + \dots + c_n \frac{d^n V_{\rm B}}{dt^n} + \dots,$$
(7)

где 
$$c_0 = [W(p) - 1]_{p=0}; c_1 = \frac{d}{dp} [W(p) - 1]_{p=0}; c_2 = \frac{1}{2!} \frac{d^2}{dp^2} [W(p) - 1]_{p=0}; c_n = \frac{1}{n!} \frac{d^n}{dp^n} [W(p) - 1]_{p=0}$$

Можно показать, что при изменении входных сигналов исследуемой системы воздушных сигналов, например, истинной воздушной скорости с постоянной скоростью  $\dot{V}_{\rm B0}$ , в установившемся режиме собственная динамическая погрешность измерительного канала, например, истинной воздушной скорости будет определяться значением

$$\Delta V_{\rm BC}(t) = \tau_{\rm n} \dot{V}_{\rm B0} . \tag{8}$$

В общем случае входные сигналы исследуемой системы являются случайной функцией времени. Для стационарного характера изменения случайного входного сигнала, например, истинной воздушной скорости с известной автокорреляционной функцией  $K_V(\tau)$  или спектральной плотностью мощности  $S_V(\omega)$  выражение для дисперсии собственной динамической погрешности канала будет иметь вид [13]

$$D_{VC} = \sigma_{VC}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(p) - 1|_{p=j\omega}^2 S_V(\omega) d\omega .$$
<sup>(9)</sup>

Как показано в работе [15], стационарные случайные процессы изменения высотно-скоростных параметров ЛА на отдельных этапах полета можно характеризовать экспоненциально коррелированным случайным процессом, например, по каналу истинной воздушной скорости с автокорреляционной функцией и спектральной плотностью мощности вида

$$K_{V_{\rm B}}(\tau) = \sigma_{V_{\rm B}}^2 e^{-a_V |\tau|}; \ S_{V_{\rm B}}(\omega) = \frac{\sigma_{V_{\rm B}}^2}{\pi} \frac{a_V}{a_V^2 + \omega^2},$$
(10)

где  $\sigma_{V_{\rm B}}^2$  – дисперсия случайного процесса;  $a_V$  – параметр, определяющий спектр частот случайного процесса.

Вынужденные случайные динамические погрешности измерительных каналов системы воздушных сигналов на основе вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости обусловлены случайными изменениями во времени действующих внешних помех в виде атмосферной турбулентности и других возмущений атмосферы. При известной автокорреляционной функции или спектральной плотности мощности стационарной помехи входного сигнала, например, истинной воздушной скорости дисперсия вынужденной динамической погрешности имеет вид [13]

$$D_{V_{\rm B}} = \sigma_{V_{\rm B}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| W(p) \right|_{p=j\omega}^2 S_{\xi}(\omega) d\omega, \qquad (11)$$

где  $S_{\xi}(\omega)$  – спектральная плотность мощности случайной помехи на входе измерительного канала.

Как показано в работе [2], математическую модель случайной атмосферной турбулентности можно представить в виде совокупности спектральных плотностей мощности вида

$$S_{\xi x}(\omega) = \frac{2\sigma_x^2 L_x}{\pi} \frac{1}{1 + \left(\frac{L_x}{V_B}\omega\right)^2}; \ S_{\xi y}(\omega) = \frac{2\sigma_y^2 L_y}{\pi} \frac{1 + 3\left(\frac{L_y}{V_B}\omega\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{L_y}{V_B}\omega\right)^2\right]^2}; \ S_{\xi z}(\omega) = \frac{2\sigma_z^2 L_z}{\pi} \frac{1 + 3\left(\frac{L_z}{V_B}\omega\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{L_z}{V_B}\omega\right)^2\right]^2},$$
(12)

где  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$  – масштабы турбулентности по продольной, вертикальной и боковой составляющим вектора скорости  $V_T$  турбулентного возмущения;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – среднеквадратические значения интенсивностей турбулентности по соответствующим составляющим турбулентного возмущения;  $V_B$  – модуль вектора истинной воздушной скорости ЛА.

Масштабы турбулентности  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$  зависят от барометрической высоты и определяются соотношениями [2]

$$L_{x} = L_{z} = \begin{cases} 150 \text{ м при } 66\sqrt[3]{H} \le 150 \text{ м}; \\ 65,9\sqrt[3]{H} \text{ при } 66\sqrt[3]{H} > 150 \text{ м и } H < 535 \text{ м}; \\ 535 \text{ м при } H \ge 535 \text{ м}; \end{cases}$$
(13)

$$L_{y} = \begin{cases} 150 \text{ м при } H \le 150 \text{ м}; \\ 65,9\sqrt[3]{H} \text{ при } 150 \text{ м} < H < 535 \text{ м}; \\ 535 \text{ м при } H \ge 535 \text{ м}. \end{cases}$$
(14)

Среднеквадратическое значение интенсивности  $\sigma_y$  при изменении барометрической высоты находится в интервале от  $\sigma_y = 2,05$  м/с при H = 0 до  $\sigma_y = 1,38$  м/с при H = 12000 м [2].

Среднеквадратические значения интенсивности  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  атмосферной турбулентности, влияющие на продольную и боковую составляющие вектора, определяются соотношениями [2]

$$\sigma_x = \sigma_y \sqrt{\frac{L_x}{L_y}}; \quad \sigma_z = \sigma_y \sqrt{\frac{L_z}{L_y}}. \tag{15}$$

Тогда дисперсия суммарной динамической погрешности измерительных каналов системы, например, канала истинной воздушной скорости будет определяться соотношением

$$D_{V_{\rm B}\Sigma} = \sigma_{V_{\rm B}}^2 + \sigma_{V_{\rm BB}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(p) - 1|_{p=j\omega}^2 S_{V_{\rm B}}(\omega) d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(p)|_{p=j\omega}^2 S_{\xi V}(\omega) d\omega.$$
(16)

Из выражения (16) следует, что при известных спектральных плотностях мощности входного сигнала и внешней помехи для снижения дисперсии собственной динамической погрешности передаточную функцию – операторную чувствительность W(p) измерительного канала исследуемой системы – необходимо приближать к единице, но это неизбежно приводит к возрастанию вынужденной динамической погрешности, что определяет постановку задачи оптимальной фильтрации случайных помехи.

#### Заключение

Таким образом, приведенные модели и анализ динамических погрешностей системы воздушных сигналов дозвукового ЛА на основе вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости позволяют обоснованно решать задачи обеспечения динамической точности измерительных каналов при детерминированных и случайных воздействиях.

Работа выполнена по гранту РФФИ № 18-38-00094.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Солдаткин В.М. Методы и средства построения информационно-управляющих систем обеспечения безопасности полета. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. 350 с.
- Макаров Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: теория, проектирование, применение / Под ред. В.М. Солдаткина. М.: Машиностроение, 2009. 760 с.
- 3. Браславский Д.А., Логунов С.С., Пельпор Д.С. Авиационные приборы и автоматы. М.: Машиностроение, 1978. 432 с.
- 4. *Клюев Г.И. и др.* Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов / Под ред. В.А. Мишина. Ульяновск: Ул ГТУ, 2005. 509 с.
- 5. Боднер В.А. Приборы первичной информации. М.: Машиностроение, 1981. 344 с.
- 6. Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые измерительные приборы. М.: Машиностроение, 1972. 152 с.
- 7. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости: пат. 2506596 Рос. Федерация, № 2012130111/28; заявл. 16.07.2012; опубл. 10.02.2014, Бюл. №4.
- 8. Солдаткин В.М., Солдаткина Е.С. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости // Известия вузов. Авиационная техника. 2012. №4. С.56-59.
- 9. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости: пат. 2556760 Рос. Федерация, №201411035/28; заявл. 21.04.2014; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20.
- 10. Солдаткина Е.С., Солдаткин В.М. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с расширенными функциональными возможностями // Изв. вузов. Авиационная техника. 2014. № 4. С.54–56.
- 11. Ефремова Е.С., Мифтахов Б.И., Солдаткин Р.В. Особенности построения, алгоритмы и погрешности вихревой системы воздушных сигналов дозвукового летательного аппарата // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2018. № 2. С. 87–91.
- 12. *Ефремова Е.С.* Математические модели и количественная оценка методических погрешностей вихревой системы контроля поля высотно-скоростных параметров полета // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 2 (328). С. 148–155.

- 13. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.
- 14. Иванов Ю.П., Синяков А.Н., Филатов И.В. Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов / Под. Ред. В.А. Боднера. Л.: Машиностроение, 1984. 207 с.
- 15. Солдаткин В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448 с.

Поступила в редколлегию 23.01.19

# MODELS OF DYNAMIC ERRORS OF THE VORTEX AIR DATA SYSTEM OF A SUBSONIC AIRCRAFT

## E.S. Efremova and R.V. Soldatkin

This paper considers special features of construction and algorithms of information processing for the vortex air data system of the subsonic aircraft. The dynamic characteristic is given, models of dynamic errors for the measuring channels at deterministic and random effects are obtained.

Keywords: aircraft, air signals, measurement, vortex system, measuring channels, dynamic errors, deterministic and random effects.

Ефремова Елена Сергеевна – ассистент (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: soldatkina1991@bk.ru

Солдаткин Руслан Вячеславович – инженер (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: xxx-ruslanka@mail.ru

# МОДЕЛИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРА ВЕТРА НА БОРТУ ВЕРТОЛЕТА С ИОННО-МЕТОЧНЫМИ И АЭРОМЕТРИЧЕСКИМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ

## Е.О. Арискин, В.М. Солдаткин

Рассмотрены причины и получены математические модели инструментальных погрешностей измерительных каналов системы измерения параметров вектора ветра на борту вертолета на стоянке, стартовых и взлетно-посадочных режимах.

Ключевые слова: вертолет, вектор ветра, измерение, система, ионно-меточные каналы, инструментальные погрешности, модели.

#### Введение

Расширение круга задач, выполняемых одновинтовыми вертолетами, интенсификация их использования обусловливает повышение требований к средствам информационного обеспечения пилотирования и обеспечения безопасности эксплуатации.

Эксплуатация вертолетов происходит в приземном возмущенном слое атмосферы в условиях воздействия значительных ветровых возмущений, снижающих безопасность выполнения полетных задач. На стоянке до запуска силовой установки и при раскрутке несущего винта, при рулении и маневрировании по земной поверхности (стартовый режим), на этапах взлета и набора высоты, снижения, висения и посадки (взлетно-посадочные режимы) для выполнения требований, регламентируемых Руководством по летной эксплуатации (РЛЭ) вертолета [1], и предотвращения авиационных происшествий, связанных с опрокидыванием вертолета на бок или на хвостовую балку, соударением лопастей несущего винта с землей, рулевым винтом и между собой, с другими опасными ситуациями [2], экипажу необходима достоверная информация о текущем значении скорости и угла направления вектора ветра относительно продольной оси вертолета при возможном изменении его положения в азимуте в диапазоне  $\pm 180^\circ$ . Это обусловливает необходимость установки на вертолете бортовой системы измерения параметров вектора ветра на стоянке, стартовых и взлетно-посадочных режимах вертолета.

Однако известные системы измерения параметров вектора ветра [3, 4] при установке на борту вертолета из-за влияния на их работу значительных аэродинамических возмущений, вносимых индуктивными потоками вихревой колонны несущего винта, не обеспечивают измерение скорости и угла направления ветра на стоянке, стартовых и взлетно-посадочных режимах.

# Особенности построения системы измерения параметров вектора ветра на борту вертолета

Перспективным направлением создания бортовой системы измерения параметров вектора ветра на стоянке, стартовых и взлетно-посадочных режимах вертолета является использование для целей измерения информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта [5, 6].

В качестве информативного параметра аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта при измерении параметров вектора ветра предложено [6] использовать вектор скорости  $V_{\Sigma}$  результирующего воздушного потока вихревой колонны в виде трех составляющих: стационарной составляющей V, обусловленной вектором ветра W и вектором истинной воздушной скорости  $V_{\rm B}$  поступательного движения вертолета относительно окружающей воздушной среды, стационарной составляющей  $V_i$  индуктивного потока и воздушного потока за счет силы тяги несущего винта и флуктуационной составляющей  $V_{\phi}$ , обусловленной маховыми движениями лопастей и работой автомата перекоса и приводящей к пульсациям скорости и углов скоса вихревой колонны.

Так как круговые частоты  $\omega_{\phi i}$  флуктуационных составляющих  $V_{\phi_i}$  вектора  $\mathbf{V}_{\phi}$  кратны угловой скорости  $\omega_{\mu}$  вращения несущего винта, то для повышения помехоустойчивости каналов измерения па-

раметров вектора ветра вектор флуктуационной скорости  $V_{\phi}$  результирующего воздушного потока вихревой колонны может быть в значительной степени отфильтрован от составляющих V и  $V_i$  в каналах бортовой системы измерения параметров вектора ветра с помощью соответствующих фильтров.

Тогда вектор скорости  $V_{\Sigma}$  результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта будет являться геометрической суммой вектора скорости V, формируемого вектором ветра W и вектором истинной воздушной скорости V<sub>в</sub> движения вертолета относительно окружающей среды, и вектора V<sub>i</sub> индуктивного воздушного потока, создаваемого несущим винтов вертолета, вида [6]

$$\mathbf{V}_{\Sigma} = \mathbf{W} - \mathbf{V}_{\mathrm{B}} + \mathbf{V}_{i} \,. \tag{1}$$

Для восприятия параметров вектора скорости  $W_{\Sigma}$  результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта предложено использовать неподвижный комбинированный аэрометрический приемник [6]. Приемник выполнен на основе неподвижного проточного аэрометрического приемника, в проточном канале которого в азимутальной плоскости под одинаковыми углами расположены шесть или восемь трубок полного давления для забора давлений, определяющих величину W и угол направления  $\psi$  вектора ветра W в горизонтальной плоскости на стоянке до запуска силовой установки несущего винта.

Для восприятия параметров вектора скорости  $V_{\Sigma}$  результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта на стартовых и взлетно-посадочных режимах вертолета на верхней поверхности неподвижного проточного аэрометрического приемника предложено установить на стойках полусферический приемник, на поверхности которого расположены отверстия для забора давлений, определяющих величину  $V_{\Sigma}$  и углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  положения вектора  $W_{\Sigma}$  относительно осей, параллельных продольной и вертикальной осям связанной системы координат вертолета на стартовых и взлетно-посадочных режимах вертолета.

Однако создание бортовой системы измерения параметров вектора ветра на основе неподвижного многоканального проточного аэрометрического приемника сдерживается необходимостью защиты большого числа трубок полного давления, установленных в его проточном канале, от обледенения, попадания пыли и влаги в реальных условиях эксплуатации вертолета. Кроме того, многоканальная схема преобразования воспринимаемых давлений обусловливает жесткие требования к идентичности и стабильности характеристик измерительных каналов системы. Все это усложняет конструкцию, снижает надежность и технологичность, сдерживает применение бортовой системы измерения параметров вектора ветра на вертолетах.

## Построение и алгоритмы системы измерения параметров вектора ветра на борту вертолета с ионно-меточными и аэрометрическими измерительными каналами

Для устранения недостатков бортовой системы измерения параметров вектора ветра на основе неподвижного проточного аэрометрического приемника предложено [7] построить ее на основе неподвижного приемника с ионно-меточными и аэрометрическими каналами (рисунок).

Ионно-меточные измерительные каналы предполагаемой системы выполнены на основе неподвижного панорамного ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости [8], включающего плату *1* с системой приемных электродов *3*, в центре *O* которой установлен искровой разрядник *2*, подключенный к генератору меток (ГМ) *4*.

На стоянке до запуска силовой установки вертолета при подаче на искровой разрядник 2 высоковольтного импульса от генератора меток формируется ионная метка с явно выраженным электростатическим зарядом, которая движется совместно с воздушным потоком вектора ветра W, приобретая его скорость W и направление  $\psi$ . При движении ионной метки совместно с потоком на приемных электродах наводятся электростатические заряды, величины которых зависят от расстояния R до точки генерации метки и углового положения  $\psi$  траектории движения метки.

Выходные сигналы блока предварительных усилителей 5, на входы которых подключены приемные электроды 3, поступают на входы измерительной схемы (ИС) 6, включающей канал 7 определения рабочего сектора измеряемого угла  $\psi$  (канал грубого отсчета), канал 8 точного измерения угла в рабочем секторе и канал 9 измерения величины W скорости ветра. Выходные сигналы каналов измерительной схемы подаются на вход вычислительного устройства (ВУ) 10, которое выдает цифровые коды  $N_{\psi}$  и  $N_{W}$  по углу  $\psi$  и скорости W. Вычислительное устройство также формирует сигнал  $F_{\Gamma M}$  запуска генератора ионных меток в начале каждого цикла измерения.



На стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта, на стартовых и взлетнопосадочных режимах вертолета для измерения параметров вектора ветра используются аэрометрические каналы, которые выполнены на базе неподвижного полусферического приемника 11, установленного над платой 1 с приемными электродами ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

Для восприятия информации результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта на поверхности полусферического аэрометрического приемника 11 расположены отверстия 12 для забора полного давления  $P_{n\Sigma}$  результирующего воздушного потока вихревой колонны, отверстия 13, 14 и 15, 16 для забора давлений  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$ ,  $P_4$ , определяющих углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  положения вектора скорости  $V_{\Sigma}$ относительно оси симметрии полусферического приемника в плоскости, параллельной продольной оси вертолета, и в плоскости, перпендикулярной продольной оси вертолета, а также отверстия 17 для забора статического давления  $P_{cT\Sigma}$  результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта. Воспринимаемые давления  $P_{n\Sigma}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_{cT\Sigma}$  с помощью пневмоэлектрических преобразователей перепада давлений 18 и преобразователя (датчика) абсолютного давления 19 преобразуются в электрические сигналы, которые через канал 20 аналого-цифрового преобразования, включающего мультиплексор 21 и АЦП 22, подаются в вычислительное устройство 10, на выходе которого формируются цифровые сигналы по скорости W и углу направления  $\psi$  вектора ветра W.

# Алгоритмы определения параметров вектора ветра и инструментальные погрешности измерительных каналов системы на характерных режимах эксплуатации вертолета

Особенности ионно-меточных и аэрометрических измерительных каналов рассматриваемой системы измерения параметров вектора ветра определяют специфику алгоритмов и инструментальных погрешностей измерительных каналов на различных режимах эксплуатации вертолета.

На стоянке до запуска силовой установки величина  $W_r$  и угол направления  $\psi$  горизонтального вектора ветра  $W_r$  определяются в ионно-меточных измерительных каналах в соответствии с алгоритмами [9]

$$W_{\rm r} = \frac{R}{\tau_W}; \ \psi = i\alpha_0 + \alpha_{\rm p}; \ \alpha_{\rm p} = \arctan\frac{A_i \sin \alpha_i}{A_i \cos \alpha_i}, \tag{2}$$

где  $\tau_W$  – время пролета ионной метки от точки O генерации ионной метки до окружности радиуса R с расположенными на ней приемными электродами;  $\alpha_0$  – угол, охватывающий рабочий сектор грубого канала отсчета (при  $i_{\text{max}} = 4$ ,  $\alpha_0 = 90^\circ$ ); *i* – номер рабочего сектора ( $i = \overline{1, 4}$ );  $\alpha_p$  – значение измеряемого угла в пределах *i*-го рабочего сектора;  $A_i$  – амплитуда сигнала, наводимого на приемных электродах в пределах рабочего сектора.

Как известно [10], причиной инструментальных погрешностей измерительных каналов приборов и систем являются инструментальные погрешности используемых датчиков и преобразователей первичной информации.

При известном алгоритме определение выходного сигнала измерительного канала  $y=f(x_1, x_2, ..., x_n)$ , где  $x_i$  – первичные информативные сигналы, измеряемые датчиками и преобразователями первичной информации, инструментальная погрешность  $\Delta y$  измерительного канала, согласно методике работы [9] определяется из соотношения

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n + \Delta_{\text{obp}},$$
(3)

где  $\Delta x_i$  – инструментальные погрешности датчиков и преобразователей первичной информации;  $\Delta_{obp}$  – инструментальная погрешность канала вычисления выходного сигнала *у*.

Инструментальные погрешности измерения скорости и угла направления вектора горизонтального на стоянке до запуска силовой установки будут определяться как

$$\Delta W_{\rm r} = \frac{1}{\tau_W} \Delta R - \frac{R}{\tau_W} \Delta \tau_W ; \ \Delta \psi = \Delta \alpha_0 + \Delta \alpha_{\rm p}, \tag{4}$$

где  $\Delta R$  – технологический разброс (допуск) на радиусе *R* размещения приемных электродов;  $\Delta \tau_W$  – инструментальная погрешность канала регистрации момента времени пролета ионной метки расстояния *R*;  $\Delta \alpha_0$  и  $\Delta \alpha_p$  – инструментальные погрешности задания рабочих секторов по углу атаки и регистрации углового положения ионной метки внутри рабочих секторов.

Таким образом, инструментальные погрешности измерения параметров вектора ветра на стоянке определяются погрешностями используемого ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

На стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта параметры вектора горизонтального ветра  $W_{\rm r}$  определяются в соответствии с алгоритмами [9]

$$W_{x} = V_{\Sigma} \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{0}} \frac{P_{1} - P_{2}}{P_{\pi\Sigma} - P_{c\tau\Sigma}} - K_{ix}V_{i0} = V_{\Sigma} \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{0}} \frac{\Delta P_{1}}{\Delta P_{\Sigma}} - K_{ix}V_{i0};$$

$$W_{z} = V_{\Sigma} \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{0}} \frac{P_{3} - P_{4}}{P_{\pi\Sigma} - P_{c\tau\Sigma}} - K_{iz}V_{i0} = V_{\Sigma} \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{0}} \frac{\Delta P_{2}}{\Delta P_{\Sigma}} - K_{iz}V_{i0};$$

$$W_{\Gamma} = \sqrt{W_{x}^{2} + W_{z}^{2}}; \quad \Psi = \operatorname{arctg} \frac{W_{z}}{W_{x}};$$

$$V_{\Sigma} = 44,826 \sqrt{\frac{T_{\tau\Sigma} \left[ \left( \frac{P_{\pi\Sigma} - P_{c\tau\Sigma}}{P_{c\tau\Sigma}} + 1 \right)^{0.2857143} - 1 \right]}{\left( \frac{P_{\pi\Sigma} - P_{c\tau\Sigma}}{P_{c\tau\Sigma}} + 1 \right)^{0.2857143}}} = a \sqrt{T_{\tau\Sigma} \left[ 1 - \left( \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{c\tau\Sigma}} + 1 \right)^{b} \right]},$$
(5)

где  $T_{\text{T}\Sigma}$ ,  $P_{\text{п}\Sigma}$  и  $P_{\text{ст}\Sigma}$  – температура торможения, полное и статическое давление результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта;  $P_1 - P_4$  – давления, воспринимаемые на поверхности полусферического приемника;  $2\phi_0$  – углы установки отверстий для восприятия давлений  $P_1 - P_4$ ;  $K_{ix}$ ,  $K_{iz}$  – безразмерные коэффициенты;  $V_{i0}$  – величина скорости индуктивного воздушного потока вихревой колонной несущего винта на режиме висения, принятой известной для данного типа вертолета; a = 44,826 и b = 0,2857143.

Инструментальные погрешности каналов вектора скорости ветра на данном режиме эксплуатации вертолета без учета погрешности канала обработки будут определяться инструментальными погрешно-

стями  $\Delta(\Delta P_1)$ ,  $\Delta(\Delta P_2)$ ,  $\Delta(\Delta P_{\Sigma})$ ,  $\Delta P_{cr\Sigma}$ ,  $\Delta T$  используемых датчиков перепадов давлений  $\Delta P_1 = P_1 - P_2$ ,  $\Delta P_2 = P_3 - P_4$ ,  $\Delta P_{\Sigma} = P_{n\Sigma} - P_{cr\Sigma}$ , датчиков абсолютного давления  $P_{cr\Sigma}$  и приемника температуры  $T_{\Sigma}$  результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта.

Тогда инструментальные погрешности каналов измерения скорости  $W_{\Gamma}$  и угла направления  $\psi$  горизонтального вектора ветра  $W_{\Gamma}$  на стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта без учета погрешности канала вычисления будут определяться соотношениями

$$\Delta W_{x} = \frac{4}{9\sin 2\varphi_{0}} \left[ \frac{P_{1} - P_{2}}{P_{n\Sigma} - P_{cr\Sigma}} V_{\Sigma} + V_{\Sigma} \frac{(P_{n\Sigma} - P_{cr\Sigma})\Delta(\Delta P_{1}) - (P_{1} - P_{2})\Delta(\Delta P_{\Sigma})}{(P_{n\Sigma} - P_{cr\Sigma})^{2}} \right];$$

$$\Delta W_{z} = \frac{4}{9\sin 2\varphi_{0}} \left[ \frac{-P_{3} - P_{4}}{P_{n\Sigma} - P_{cr\Sigma}} V_{\Sigma} + V_{\Sigma} \frac{(P_{n\Sigma} - P_{CT\Sigma})\Delta(\Delta P_{2}) - (P_{3} - P_{4})\Delta(\Delta P_{\Sigma})}{(P_{n\Sigma} - P_{cr\Sigma})^{2}} \right];$$

$$\Delta V_{\Sigma} = \frac{V_{\Sigma}}{2T_{r\Sigma}} + \frac{a^{2}\sqrt{T_{r\Sigma}}}{2V_{\Sigma}} b \left( \frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_{cr\Sigma}} + 1 \right)^{b-1} \left[ \frac{1}{P_{cr\Sigma}}\Delta(\Delta P_{\Sigma}) - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{crZ}^{2}}\Delta P_{cr} \right];$$

$$\Delta W_{r} = \frac{W_{x}\Delta W_{x} + W_{z}\Delta W_{z}}{W_{r}}; \quad \Delta \psi = \frac{1}{\cos^{2}\frac{W_{z}}{W_{z}}} \frac{W_{x}\Delta W_{z} + W_{z}\Delta W_{x}}{W_{x}^{2}}.$$
(6)

Как видно из соотношений (6), инструментальные погрешности измерительных каналов системы измерения параметров вектора ветра на борту вертолета на стоянке при вращении несущего винта определяются не только инструментальными погрешностями используемых датчиков перепада давлений  $\Delta P_1 = P_1 - P_2$ ,  $\Delta P_2 = P_3 - P_4$ ,  $\Delta P_{\Sigma} = P_{n\Sigma} - P_{cr\Sigma}$ , датчика абсолютного давления  $P_{cr\Sigma}$ , приемника температура торможения  $T_{T\Sigma}$ , но и зависят от текущих значений контролируемых параметров  $T_{r\Sigma}$ ,  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta P_{\Sigma}$ ,  $P_{cr\Sigma}$ , что необходимо учитывать при расчете максимальных значений инструментальных погрешностей измерительных каналов и обосновании требований к инструментальным погрешностям используемых датчиков и приемников первичной информации системы измерения параметров вектора ветра на борту вертолета на основе неподвижного приемника с ионно-меточными и аэрометрическими измерительными каналами.

На режиме руления и маневрирования вертолета по земной поверхности выражения для определения продольной  $W_x$  и боковой  $W_z$  составляющих величина  $W_r$  и угол направления  $\psi$  горизонтального вектора ветра  $W_{\Gamma}$  имеют вид [9]

$$W_{x} = V_{\Sigma} \frac{4}{9\sin 2\phi_{01}} \frac{P_{1} - P_{2}}{P_{n\Sigma} - P_{cr\Sigma}} - K_{ix}V_{i0} - V_{px};$$

$$W_{z} = V_{\Sigma} \frac{4}{9\sin 2\phi_{02}} \frac{P_{3} - P_{4}}{P_{n\Sigma} - P_{cr\Sigma}} - K_{iz}V_{i0} - V_{pz}; W_{\Gamma} = \sqrt{W_{x}^{2} + W_{z}^{2}}; \quad \Psi = \operatorname{arctg} \frac{W_{z}}{W_{x}},$$
(7)

где  $V_{px}$  и  $V_{pz}$  – продольная и боковая составляющие вектора скорости  $V_p$  руления и маневрирования вертолета по земной поверхности, определяемые по информации спутниковой навигационной системы, установленной на вертолете.

Тогда пренебрегая инструментальными погрешностями спутниковой навигационной системы, инструментальные погрешности измерительных каналов системы измерения параметров вектора ветра на режиме руления и маневрирования по земной поверхности можно оценить, используя соотношения (6).

На взлетно-посадочных режимах вертолета, используя информацию о величине  $V_{\pi}$  и угле сноса  $\varphi_c$  вектора путевой скорости  $V_{\pi}$  от доплеровского измерителя путевой скорости и угла сноса, параметры горизонтального вектора ветра  $W_{\Gamma}$  можно определить в соответствии с соотношениями [9]

$$W_{x} = |V_{x}| - V_{\pi} \cos\psi_{c}; W_{z} = |V_{z}| - V_{\pi} \sin\psi_{c}; \psi = \beta + \psi_{c}; W_{\Gamma} = \sqrt{W_{x}^{2} + W_{z}^{2}};$$
  
$$V_{x} = V_{\Sigma} \frac{4}{9\sin 2\phi_{0}} \frac{P_{1} - P_{2}}{P_{\pi\Sigma} - P_{c\tau\Sigma}} - K_{ix}V_{i0}; V_{z} = V_{\Sigma} \frac{4}{9\sin 2\phi_{0}} \frac{P_{3} - P_{4}}{P_{\pi\Sigma} - P_{c\tau\Sigma}} - K_{iz}V_{i0}.$$
 (8)

Тогда без учета погрешности канала вычисления инструментальные погрешности измерительных каналов системы измерения параметров горизонтального вектора ветра исследуемой системы будут определяться соотношениями

$$\Delta W_{x} = \frac{4}{9\sin 2\varphi_{0}} \left[ \frac{P_{1} - P_{2}}{P_{n\Sigma} - P_{cT\Sigma}} V_{\Sigma} + V_{\Sigma} \frac{(P_{n\Sigma} - P_{cT\Sigma})\Delta(\Delta P_{1}) - (P_{1} - P_{2})\Delta(\Delta P_{\Sigma})}{(P_{n\Sigma} - P_{cT\Sigma})^{2}} \right] - \cos\varphi_{c}\Delta V_{n} + \\ + \sin\varphi_{c}\Delta\varphi_{c} - z\Delta\omega_{y} + y\Delta\omega_{x};$$

$$\Delta W_{z} = \frac{4}{9\sin 2\varphi_{0}} \left[ \frac{P_{3} - P_{4}}{P_{n\Sigma} - P_{cT\Sigma}} V_{\Sigma} + V_{\Sigma} \frac{(P_{n\Sigma} - P_{CT\Sigma})\Delta(\Delta P_{2}) - (P_{3} - P_{4})\Delta(\Delta P_{\Sigma})}{(P_{n\Sigma} - P_{cT\Sigma})^{2}} \right] - \sin\varphi_{c}\Delta V_{n} - \\ -V_{n}\cos\varphi_{c} - y\Delta\omega_{x} + x\Delta\omega_{y};$$

$$\Delta V_{\Sigma} = \frac{V_{\Sigma}}{2T_{\tau\Sigma}}\Delta T_{\tau\Sigma} + \frac{a^{2}\sqrt{T_{\tau\Sigma}}}{2V_{\Sigma}}b\left(\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_{CT\Sigma}} + 1\right)^{b-1} \left[ \frac{1}{P_{cT\Sigma}}\Delta(\Delta P_{cT\Sigma}) - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{cT\Sigma}}\Delta P_{cT\Sigma} \right];$$
(9)

$$2I_{\rm T\Sigma} \qquad 2V_{\Sigma} \qquad \left(\Delta P_{\rm CT\Sigma}\right) \qquad \left[P_{\rm cr\Sigma}\right] \qquad 0 \qquad P_{\rm cr\Sigma}$$
$$\Delta W_{\rm r} = \frac{W_x \Delta W_x + W_z \Delta W_z}{W_{\rm r}}; \quad \Delta \psi = \Delta \beta - \Delta \phi_{\rm c},$$

где  $\Delta V_{\rm n}$  и  $\Delta \phi_{\rm c}$  – погрешности каналов доплеровского измерителя путевой скорости и угла сноса;  $\Delta \omega_x, \Delta \omega_y, \Delta \omega_z$  – погрешности измерения угловых скоростей вращения вертолета относительно оси связанной системы координат; *x*, *y*, *z* – координаты места установки неподвижного приемника в связанной системе координат.

#### Заключение

Полученные модели инструментальных погрешностей измерительных каналов системы измерения параметров вектора ветра на борту вертолета на различных режимах эксплуатации позволяют решать задачи анализа точности и выбора датчиков первичной информации при проектировании вариантов системы для вертолетов различных классов и назначения.

Работа выполнена по гранту РФФИ №18-38-00187.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Руководство по летной эксплуатации вертолета Ми-8 (издание 4-е). М: Авторитет, 1996. 554 с.
- 2. Ерусалимский М.А., Егоров В.Н. Экипажам вертолетов информационную поддержку // Авиасоюз. 2011. № 2. С. 24–26.
- 3. Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах / Под ред. Л.П. Афиногенова, Е.В. Романова. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 448 с.
- 4. *Азбукин А.А. и др.* Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 42-52.
- 5. Солдаткин В.В. Система воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного аэрометрического приемника и информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. 284 с.
- 6. *Никитин А.В., Солдаткин В.М.* Система измерения параметров вектора ветра и истинной воздушной скорости на борту вертолета // Датчики и системы. 2015. № 4. С. 48–54.
- 7. Бортовая система измерения параметров вектора скорости ветра на стоянке, стартовых и взлетнопосадочных режимах: пат. 2587389 Рос. Федерация, № 2014150161/11, заявл. 10.12.2014. 20.06.2016, Бюл. № 17.
- 8. Ганеев Ф.А., Солдаткин В.М. Ионно-меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки // Изв. вузов. Авиационная техника. 2010. № 3. С. 46–50.
- 9. Арискин Е.О., Лисин Р.А., Миннебаев М.Р. Особенности построения и алгоритмическое обеспечение системы измерения параметров вектора ветра на борту вертолета с ионно-меточными и аэрометрическими измерительными каналами // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2018. № 2. С. 79-86.
- 10. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.

Поступила в редколлегию 23.01.19

# MODELS OF INSTRUMENT ERRORS FOR THE SYSTEM OF MEASURING THE WIND VECTOR PARAMETERS ABOARD A HELICOPTER WITH ION-METER AND AEROMETRIC SENSING CHANNELS

## E.O. Ariskin, and V.M. Soldatkin

The reasons are considered and mathematical models are obtained for instrument errors of sensing channels of the system for measuring the wind vector parameters aboard a helicopter during parking, launch and takeoff-landing modes.

Keywords: helicopter, wind vector, measurement, system, ion-metering channels, instrument errors, models.

**Арискин Евгений Олегович** – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: ariskineo@mail.ru

Солдаткин Владимир Михайлович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: w-soldatkin@mail.ru

# ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ НА ЭТАЛОНАХ МАССОВОГО РАСХОДА ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ

## В.Н. Петров, О.К. Шабалина, С.В. Петров, А.С. Шабалин

Рассматривается воспроизведение многофазных потоков в рабочем канале эталонов массового расхода газожидкостных смесей в широком диапазоне расхода газовой фазы. Рассмотрены технические особенности, плюсы и минусы устройств, позволяющих создать многофазный поток и получивших широкое распространение в конструкциях камер сгорания воздушно-реактивных двигателей. Исследована физика распада струи и дробления капли. Представлена методика расчета угла распыла жидкой фазы, изменения скорости и концентрации на оси струйной и центробежной форсунок.

# Ключевые слова: воспроизведение, капельное течение, распад струи, дробление капли, форсунка, угол распыла.

За последние десятилетия как за рубежом, так и в России, на рынке измерительных систем с целью измерения дебита нефтяных скважин появилось измерительное устройство нового типа – многофазный расходомер (МФР). Появление МФР обусловлено потребностями нефтяной промышленности при проведении морских работ и стремлением получить более компактное оборудование для исследований скважин. МФР сегодня стал ключевым инструментом измерения дебита скважины благодаря возможности его использования в эксплуатационной линии в качестве стационарного устройства мониторинга. Полученные в результате измерений данные используются для оценки производительности отдельной скважины или определенного лицензионного участка, они также позволяют улучшить контроль над ресурсами, что, в свою очередь, способствует уменьшению падения добычи и позволяют повысить прогнозируемую добычу на месторождении. МФР получили широкое распространение благодаря низким капитальным затратам при использовании. В свою очередь, с целью поверки и калибровки МФР за рубежом созданы многофазные испытательные стенды (МИС) [1], а в России – эталоны массового расхода газожидкостных смесей (далее – эталоны). В соответствии с ГОСТ Р 8.637-2013 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений массового расхода многофазных потоков» поверочную схему возглавляет Государственный первичный специальный эталон единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011 (далее – первичный эталон). Отметим, что в соответствии с ГОСТ 8.381-2009 «ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности» эталоны должны иметь три взаимосвязанных свойств: неизменность, воспроизводимость и сличаемостью. Таких требований к МИС не предъявляется. С целью передачи воспроизведенной эталоном единицы измерений, как это показано в работе [2], необходимо подобие структуры течения газожидкостной смеси по длине рабочего участка. В работе рассмотрены условия выполнения этого подобия трехкомпонентной (имитатор нефти, вода и воздух) газожидкостной смесью в рабочем участке эталонов. Также в статье предлагается расчет устройств, позволяющих смоделировать течение многофазного потока в широком диапазоне измерений расхода газовой фазы. Данный поток в горизонтальном рабочем участке может иметь капельный, кольцевой или расслоенный режимы течения. Надо заметить, что горизонтальная конфигурация рабочего участка на эталонах массового расхода газожидкостных смесей наиболее предпочтительна. С целью создания капельного режима течения, переходящего в кольцевое и т.д., необходимо изучить устройства, позволяющие его создать. Рассмотрим технические устройства, позволяющие создать капельное течение. При разработке воздушно-реактивных двигателей (ВРД) и жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) широкое распространение получили струйные и центробежные форсунки. Принцип их действия и метод расчета представлены далее.

Струйная форсунка (рис. 1) подает жидкую фазу в виде компактной струи, которая при движении распадается на капли крупного размера. При этом угол распыла форсунки составляет

$$2\alpha = 5 \div 20^{\circ}.$$



Рис. 1. Схема струйной форсунки

К основным характеристикам струйной форсунки относится скорость истечения и расход жидкости из сопла, которые можно получить из преобразованного уравнения Бернулли:

$$v_{\rm sc} = \sqrt{2(p_{\rm T.B}^* - p_{\rm c.p})/\rho_{\rm sc}}, \qquad (1)$$

где  $p_{\text{т.в}}^*$  – давление торможения на входе в форсунку;  $p_{\text{с.р}}$  – статическое давление в рабочем участке;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости.

Массовый расход с учетом формулы (1) можно записать формулой

$$G_{\rm sc} = F_{\rm c.\phi} \rho_{\rm sc} v_{\rm sc} = \pi r_{\rm c}^2 \sqrt{2\rho_{\rm sc} \Delta p}, \qquad (2)$$

где  $F_{\rm c, \phi}$  – площадь сопла форсунки;  $\Delta p = p_{\rm r, B}^* - p_{\rm c, p}$ ;  $r_{\rm c}$  – радиус сопла.

На практике необходимо эту формулу уточнить коэффициентом расхода, учитывающим потери энергии на трение, и неравномерностью поля скоростей жидкости на выходе. С учетом этого массовый расход запишется формулой

$$G_{\rm *} = \pi \mu_{\rm \phi} r_{\rm c}^2 \sqrt{2\rho_{\rm *} \Delta p}, \qquad (3)$$

где  $\mu_{\phi}$  – коэффициент расхода форсунки. Коэффициент расхода форсунки зависит от отношения  $\frac{l_c}{d_c}$ ;  $l_c$  – длина цилиндрической части сопла;  $d_c$  – диаметр сопла:

при 
$$\frac{l_c}{d_c} = 0, 5 \div 1, \mu_{\phi} = 0, 6 \div 0, 65;$$
  
при  $2 < \frac{l_c}{d_c} < 5, \mu_{\phi} = 0, 75 \div 0, 85.$ 

Струя, образующаяся на выходе из сопла, подчиняется законам турбулентного струйного течения. Так, удельный секундный расход жидкости через форсунку в данной точке поперечного сечения можно представить в виде выражения

$$q = \frac{dG_{\star}}{dF} = \alpha \rho g U. \tag{4}$$

тогда на оси струи

$$q_m = \frac{dG_m}{dF} = \mathfrak{a}_m U_m \rho g = \mathfrak{a}_m U_0 \rho g \frac{U_m}{U_0},$$
(5)

Здесь: 
$$\mathfrak{a}_m = \frac{0.75\overline{U}_m}{\frac{1}{s}0.6\overline{U}_m}; \quad S = \frac{G_{\#}U_0}{l_0g};$$
 для струи жидкости  $l_0 = \frac{G_{\#}U_{\#}}{g}; \quad G_{\#}$  – расход жидкости;

æ – концентрация на оси;  $U_m$  – скорость на оси; индекс «0» – параметры на выходе из сопла;  $\overline{U}_m = \frac{U_m}{U_0}$ .

Принимая во внимание, что профили скорости и концентрации записываются теми же зависимостями, что и для описания однофазной струи, запишем [3]:

$$\frac{U}{U_m} = \left(1 - \xi^{1,5}\right)^2, \tag{6}$$

$$\frac{x}{x_m} = 1 - \xi^{1,5},$$

где  $\xi = \frac{y}{r}$  – безразмерная координата, *y* – текущий радиус точки; *r* – радиус сечения струи.

С учетом формул (6), поделив (4) на (5), получим

$$\frac{q}{q_m} = \frac{\mathfrak{X}}{\mathfrak{X}_m} \frac{U}{U_m} = \left(1 - \xi^{1,5}\right)^3.$$
(7)

Изменение скорости и концентрации на оси струи воды в воздухе показано на рис. 2, где  $\overline{U}_m = \frac{U_m}{U_0}$ ,

 $\bar{x} = \frac{x}{x_c}$ , *x* – текущая координата. Из рис. 2 следует, что длина начального участка составляет  $x_H \approx 300$  и в дальнейшем происходит интенсивное падение осевой скорости. Значение скорости  $U_0$  на выходе из сопла для любого влагосодержания нефти можно определить из формулы (1).



Рис. 2. Изменение скорости и концентрации на оси водяной струи [5] ( - - - учет переходного участка струи)

На рис. 2 также дана кривая изменения концентрации жидкой фазы на оси струи  $\mathfrak{a}_m = \frac{G_{\mathfrak{k}}}{G_{\mathfrak{k}}}$ , где  $G_{\mathfrak{k}}, G_{\mathfrak{k}}$  – весовой секундный расход жидкости и воздуха.

Надо заметить, что отношение длины сопла к его выходному диаметру  $\frac{l_c}{d_c}$  существенно влияет на размеры капель. Установлено, что величина среднего диаметра капли непрерывно уменьшается в диапазоне изменения  $0, 4 < \frac{l_c}{d_c} < 2, 22$ .

Центробежная форсунка отличается от струйной принципом действия. Центробежная форсунка представляет собой камеру закручивания потока по винтовой линии (рис. 3). На выходе из сопла форсунки струя преобразуется в пленку, образуя поверхность сложной формы – однолопастной гиперболоид, при этом концентрация жидкой фазы в факеле представляет «двухгорбое» распределение.



Рис. 3. Центробежная форсунка: *a* – вид с торца (*r*<sub>c</sub> – радиус сопла, *r<sub>m</sub>* – радиус вихря, *V*<sub>вх</sub> – скорость входа жидкости, *R* – радиус закручивания, *r* – радиус факела, *U* – скорость закручивания жидкости); *б* – вид сбоку (*1* – «двухгорбое» распределение концентраций жидкости в факеле распыливания по радиусу *r*; *2* – сопловой канал; *3* – жидкая пелена у корня факела; *4* – камера закручивания; *5* – воздушный вихрь)

ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 1

В дальнейшем пленка распадается на капли, которые разлетаются по прямолинейным траекториям (цилиндрические поверхности, соосные с выходным соплом форсунки). Одним из основных параметров центробежной форсунки является средний угол распыливания, который в соответствии с работой [4] можно определить из следующей зависимости:

$$tg\overline{\alpha} = 2\mu_{\phi}A / \sqrt{\left(1+S\right)^2 - 4\mu_{\phi}^2 A^2},$$
(8)

где  $\mu_{\phi}$  – коэффициент расхода форсунки; A – геометрическая характеристика центробежной форсунки; S – безразмерный радиус вихря на срезе форсунки.

Угол распыливания поможет определить расстояние от форсунки до места попадания капли на поверхность рабочего участка, т.е. место, с которого начинает формироваться кольцевой режим течения. При этом необходимо учитывать скорость сносящего потока.

Запишем выражения, входящие в формулу (8). Безразмерный радиус вихря на срезе сопла можно определить по формуле

$$S = \frac{r_{\rm B.C}}{r_{\rm c}},\tag{9}$$

где  $r_{\rm B,c}$  – радиус газового вихря на срезе сопла.

Надо заметить, что внутренняя полость форсунки сообщается с окружающей средой и давление закрученного потока жидкой фазы не может быть ниже давления окружающей среды. В связи с этим скорость закрученного потока жидкой фазы возрастает по мере приближения ее к оси форсунки, пока давление в закрученном потоке жидкости не достигнет давления окружающей среды. При этом дальнейшее уменьшение давления и роста скорости физически невозможно. Отсюда следует, что центральная часть форсунки, где давление равно давлению окружающей среды, не заполнено жидкостью, и в этой части находится газовый пузырь с радиусом газового вихря  $r_{\rm B}$ . Выражение для коэффициента заполнения сечения сопла форсунки имеет вид

$$\varphi = 1 - \frac{r_{\rm B}^2}{r_{\rm c}^2},\tag{10}$$

где  $r_{\rm c}$  – радиус выходного сопла форсунки;  $r_{\rm B}$  – радиус газового вихря. Геометрическую характеристику центробежной форсунки определим из выражения

$$A = 1 - \frac{Rr_{\rm c}}{r_{\rm BbIX}^2},\tag{11}$$

где *R* – радиус вращения частиц жидкости на входе в форсунку; *r*<sub>вых</sub> – радиус выходного сопла форсунки. Коэффициент расхода форсунки определяется из выражения

$$\mu_{\phi} = 1 / \sqrt{\frac{1}{\phi^2} + \frac{A^2}{1 - \phi}} .$$
 (12)

Из условия, что газовый вихрь при заданном напоре обеспечивает максимальный расход жидкости через форсунку и обладает устойчивостью, оптимальное значение ф должно соответствовать минимальному значению функции, входящей в подкоренное выражение формулы (12). Вторая производная от подкоренного выражения позволяет получить зависимость между коэффициентом «живого сечения» и геометрической характеристикой форсунки:

$$A = (1 - \varphi) \bigg/ \sqrt{\frac{\varphi^3}{2}}.$$
(13)

Решая совместно выражения (12) и (13), получим простую формулу для определения коэффициента расхода форсунки:

$$\mu_{\phi} = \sqrt{\phi^2 (2 - \phi)}. \tag{14}$$

Изменение угла распыла  $2\overline{\alpha}$  в зависимости от геометрической характеристики центробежной форсунки представлено на рис. 4.



Рис. 4. Изменение угла распыла центробежной форсунки в зависимости от геометрической характеристики форсунки

Используя аналогичный подход, что и при выводе формул скорости и массового расхода струйной форсунки, определим эти характеристики и для центробежной форсунки.

Пренебрегая силами трения, закон неизменности момента количества движения (произведение скорости вращения на радиус *r* сохраняется постоянным от одной струйки жидкости к другой. Следовательно, для форсунки можно записать следующую зависимость:

$$U_{\rm BX}R = U_{u}r,\tag{15}$$

где  $U_{\rm BX}$  – скорость жидкости на входе в форсунку;  $U_u$  – скорость вращения; r – радиус вращения частицы жидкости в выходном сечении сопла; R – радиус камеры закручивания.

По закону сохранения энергии единицы объема жидкости (уравнение Бернулли), в установившемся движении идеальной жидкости сумма потенциальной энергии, т.е. давления и кинетической энергии, обусловленной скоростью, сохраняется постоянной вдоль всей струйки тока, в нашем случае – от исходного давления  $p_{\rm Bx}$  до выхода из канала. Уравнение Бернулли связывает параметры струйки, текущей сквозь форсунку в различных поперечных сечениях, при этом величина энергии в форсунке не изменяется и ее можно определить из уравнения

$$p_{\rm BX} + \frac{\rho U_{\rm BX}^2}{2} = p + \frac{\rho U_u^2}{2} + \frac{\rho U_a^2}{2} = P_{\phi 0}, \tag{16}$$

где  $p_{\text{вх}}$ , p – статическое давление на входе в форсунку и на выходе из нее;  $\rho$  – плотность жидкости;  $P_{\phi 0}$  – полное давление на входе в форсунку.

В уравнении (16) суммарная кинетическая энергия жидкости находится в сложном движении и через сопло форсунки, где она движется по винтовой линии, складывается из энергии поступательного движения и вращательного. Осевую составляющую скорости можем получить, используя формулу:

$$U_a = \frac{U_3}{\varphi},\tag{17}$$

где  $\phi$  – коэффициент заполнения сечения сопла форсунки;  $U_3$  – эквивалентная осевая скорость, которая определяется не через кольцевую площадь форсунки, а через всю площадь поперечного сечения сопла форсунки и имеет значение:

$$U_{\mathfrak{z}} = \frac{Q}{\pi r_{\rm c}^2},\tag{18}$$

где Q – секундный расход жидкой фазы, определяется по формуле

$$Q = U_{\rm BX} \pi r_{\rm BX}^2. \tag{19}$$

Из (18) и (19) через эквивалентную осевую скорость находим значение скорости входа жидкости в форсунку:

$$U_{\rm BX} = U_{\rm s} \frac{r_{\rm c}^2}{r_{\rm BX}^2} \,. \tag{20}$$

Используя зависимость (15) и (16) и формулу (20), получим формулу для определения скорости вращения

$$U_{u} = U_{3} \frac{R}{r} \frac{r_{\rm c}^{2}}{r_{\rm px}^{2}}.$$
 (21)

Ранее представлен расчет всех параметров, входящих в формулу (8). Также, зная осевую составляющую скорости жидкой фазы, можно определить дальнобойность струи.

Надо заметить, что плотности жидкой фазы, состоящей из двух компонент (воды и имитатора нефти), в формулах при расчете струйной и центробежной форсунки определяется в соответствии с работой [5] по формуле

$$\rho_{*} = \frac{\rho_{B}\rho_{MM}}{\left[\rho_{B} - \frac{W}{100}(\rho_{B} - \rho_{MM})\right]},$$
(22)

где  $\rho_{\rm B}$ ,  $\rho_{\rm им}$  – плотность воды и имитатора нефти; *W* – массовая доля воды в жидкой фазе газожидкостного потока (в процентах).

Таким образом, приводится метод расчета струйной и центробежной форсунки. Статья поможет проектировщикам эталонов массового расхода газожидкостных смесей грамотно воспроизвести многофазный поток в широком диапазоне изменения расхода газовой фазы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Falcone G., Hewitt G.F., Alimonti C. Multiphase flow metering. Principles and Applications. Amsterdam: Elsevier, 2009. 328 p.
- 2. Петров В.Н. и др. Анализ подобия многофазных потоков // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2018. № 2. С. 4–9.
- 3. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматлит, 1960. 716 с.
- 4. Васильев А.П. и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. М.: Высш. школа, 1983. 703 с.
- 5. ISO 10790:2015 Measurement of fluid flow in closed conduits Guidance to the selection, installation and use of Coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements) [Electronical Resource]. URL: https://www.iso.org/ru/standard/57407.html (дата обращения: 1.11.2018).

Поступила в редколлегию 7.11.18

# REPRODUCTION OF MULTIPHASE FLOWS AT THE STANDARDS OF THE MASS FLOW OF GAS-LIQUID MIXTURES

## V.N. Petrov, O.K. Shabalina, S.V. Petrov, and A.S. Shabalin

The paper considers the reproduction of multiphase flows in the working channel of the standards of mass flow of gas-liquid mixtures in a wide range of flow of the gas phase. The technical features, pros and cons of devices that allow creating a multiphase flow and are widely used in the design of the combustion chambers of air-breathing engines are considered. The physics of jet disintegration and droplet crushing is investigated. A technique for calculating the spray angle of the liquid phase, changes in speed and concentration on the axis of the jet and centrifugal nozzles is presented.

# Keywords: reproduction, drip flow, jet disintegration, droplet crushing, nozzle, spray angle.

**Петров Владимир Николаевич** – канд. техн. наук (ФГУП «ВНИИР», Казань) E-mail: petr\_vl\_n@mail.ru

Шабалина Ольга Константиновна – начальник ОСМК (ФГУП «ВНИИР», Казань)

E-mail: geogmord@mail.ru

**Петров Сергей Владимирович** – директор (ООО «БРИЗ», Казань) E-mail: petrov\_1972@mail.ru

Шабалин Алексей Сергеевич – канд. техн. наук (ФГУП «ВНИИР», Казань) E-mail: shabalin90@yandex.ru

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ И ЦИФРОАНАЛОГОВЫХ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ И СИГНАЛОВ

## И.В. Рябов, Е.С. Клюжев, И.В. Стрельников, П.М. Юрьев

Представлены принципы построения и структурно-схемотехнические решения систем синтеза частот и сигналов, построенных на базе методов косвенного аналогового и прямого цифрового синтеза частот. Проведен анализ технических характеристик различных структур синтезаторов частот, выявлены их достоинства и недостатки. Определены границы применения косвенного аналогового синтеза частот и прямого цифрового синтеза частот.

Ключевые слова: методы аналогового синтеза частот, методы прямого цифрового синтеза частот, цифровые вычислительные синтезаторы, цифровые накопители частоты и фазы, ждущий мультивибратор, опорный (эталонный) генератор, блок формирования и задержки, функциональный преобразователь код-синус, преобразователь кодов, цифроаналоговый преобразователь, фильтр низких частот, регистр, триггер, умножитель/делитель частоты, амплитудный и фазовый шум, спектральная чистота выходного сигнала.

#### Введение

Существенный прогресс в области радиотехники и информационно-измерительных и управляющих систем по формированию и обработке информации предъявляет все более жесткие требования к источнику несущего сигнала информационных сообщений. На современном уровне развития систем связи и информационно-измерительных и управляющих систем при проектировании возбудителей предпочтение отдается системам синтеза частот (синтезаторам частот). Данные устройства являются одними из основных функциональных узлов современных радиоэлектронных средств (РЭС), позволяющие повысить их помехоустойчивость при сравнительно низкой мощности излучения, поэтому задача формирования высокостабильных частот и сигналов крайне актуальна. Синтезаторы частот (СЧ) находят применение во всех областях радиотехники: в радиолокации и навигации, телевидении и радиовещании, современных адаптивных системах связи, радиолокации и радиоастрономии и информационно-измерительных системах. При этом проектируемые СЧ должны обеспечивать компактное размещение каналов радиосвязи с предельно мелкой сеткой и минимальными допусками на долговременную нестабильность и точность установки частоты, широкий диапазон перестройки, высокую чистоту спектра выходного сигнала и минимально возможное время перестройки с одной частоты на другую [1].

В настоящее время основными методами синтеза частот и сигналов являются косвенный аналоговый синтез с петлей фазовой автоподстройки частоты (synthesizers PLL) и прямой цифровой синтез сигналов (DDS synthesizers). Каждый вид синтеза характеризуется своими недостатками и преимуществами, поэтому при выборе синтезатора частоты часто приходится руководствоваться компромиссом.

Развитие систем синтеза частот (ССЧ) в настоящее время идет в основном в рамках известных структурных схем по пути их интегральной реализации, технологического повышения быстродействия, снижения энергопотребления и стоимости [2].

Целью работы является сравнение структур косвенных аналоговых синтезаторов частоты и структур прямых цифровых синтезаторов и сравнение их функциональных возможностей и технических характеристик.

#### Метод прямого цифрового синтеза сложных широкополосных сигналов

Метод прямого цифрового синтеза является принципиально новым методом получения сетки частот и внедрен в практику в середине 70-х гг. Он основан на преобразовании не самих колебаний, а значений их цифровых отсчетов. В цифровых синтезаторах, построенных по данному методу, происходит нелинейное преобразование кода частоты в аналоговый многоуровневый сигнал с частотой [3]

$$f_{\rm C} = f_{\rm H} + n\Delta f , \qquad (1)$$

где  $f_{\rm C}$  – частота синтезируемого сигнала;  $f_{\rm H}$  – начальная частота синтезируемого сигнала,  $\Delta f$  – шаг сетки частот.

Появление цифровых синтезаторов частот и сигналов стало возможным благодаря значительному прогрессу в области микроэлектронной технологии и серийному освоению больших и сверхбольших цифровых интегральных схем (БИС и СБИС), а также развитию методов цифровой обработки сигналов.

Для пояснения принципа функционирования устройств цифрового синтеза сложных сигналов напомним, что цифровой сигнал может быть получен из непрерывного (аналогового) дискретизацией последнего по времени и квантования по амплитуде, т.е. представлением его совокупностью выборок. Каждая выборка может быть представлена числом, называемым кодом выборки [3].

Принцип работы многоуровневого цифрового синтезатора частот сводится к следующему. В регистр частоты записывается код начальной частоты –  $C_i$ . В аккумуляторе фазы формируются коды циклической фазы цифрового сигнала  $\varphi_i$  в соответствии со входным кодом  $C_i$ . В соответствие отсчетам фазы ставятся отсчеты амплитуды синтезируемого колебания при помощи функционального преобразователя код-синус. Далее коды, полученные в аккумуляторе фазы, подаются на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), и на его выходе формируется «ступенчатый» аналоговый сигнал. Сигнал с выхода ЦАП подается на фильтр нижних частот (ФНЧ), где он подвергается фильтрации и выделяется только первая гармоника синтезированного колебания.

Если частота опорного генератора равна  $f_0$ , то многоуровневый цифровой СЧ (ЦСЧ) согласно теореме Котельникова может синтезировать максимальную частоту

$$f_{\rm c} = f_0/2$$
, (2)

т.е. в два раза ниже опорной, что соответствует взятию двух выборок на периоде  $T_0$ . На практике многоуровневые ЦСЧ работают не с двумя, а с четырьмя выборками на периоде  $T_0$ , что связано с необходимостью иметь более высокую спектральную «чистоту синтезируемых колебаний» [4].

Прямой цифровой метод синтеза частот позволил значительно улучшить технические характеристики РЭС: в радиовещании и телевидении улучшить качество звуковых и телевизионных сигналов, в радиорелейных и спутниковых системах связи повысить качество телефонной и телевизионной связи, в радиолокации увеличить разрешающую способность по дальности и по скорости; в навигации снизить ошибки определения координат объекта, в радиосвязи улучшить помехоустойчивость, скрытность и надежность сеанса связи [5].

Достоинства цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС) – широкий диапазон синтезируемых частот, сверхмалый шаг сетки частот (доли мкГц), экстремально быстрая скорость перестройки частоты (несколько нс), преемственность фазы при перестройке частоты, низкий уровень фазовых шумов, простой алгоритм формирования сложных сигналов, возможность независимого управления амплитудой, фазой и частотой синтезируемого сигнала, хорошая повторяемость параметров при тиражировании, удобство управления при помощи цифрового интерфейса, стабильность параметров при воздействии внешних климатических факторов. Недостатки – значительное влияние джиттер-фактора опорного генератора, сравнительно высокий уровень амплитудных шумов, который зависит от разрядности используемого ЦАП на выходе цифрового синтезатора.

ЦВС могут иметь некоторые дополнительные цифровые блоки, выполняющие над сигналом различные дополнительные операции:

• умножитель опорной частоты;

• дополнительный цифровой сумматор для программирования начальной фазы;

• инверсный  $\sin(x)/x$  -фильтр для компенсации неравномерности амплитудно-частотной характеристики;

• дополнительный ЦАП для получения квадратурных сигналов *I* и *Q*;

• дополнительный компаратор с малым дрожанием для формирования цифрового тактового сигнала;

• дополнительные регистры частоты и фазы, которые могут быть заранее запрограммированы для частотной или фазовой манипуляции.

Перечисленные блоки обеспечивают расширение функциональных возможностей и улучшение технических характеристик ЦВС [6–20].

## Цифровой синтезатор частотно-модулированных сигналов на основе цифровых накопителей кодов

Схема цифровой синтезатора частотно-модулированных сигналов представлена на рис. 1. Входы первого, третьего и четвертого регистров памяти являются цифровыми входами цифрового синтезатора, а его аналоговым выходом является выход ФНЧ [6–14].



Рис. 1

ЦВС частотно- и фазомодулированных сигналов работает следующим образом.

На вход первого регистра памяти поступает код начальной частоты  $C_i$ , а на вход третьего регистра памяти – код  $D_k$ , определяющий коэффициент деления делителя с переменным коэффициентом деления и скорость изменения частоты ЦВС. Эталонный генератор вырабатывает синусоидальный сигнал опорной частоты, из которого в блоке формирования и задержки формируются тактовые импульсы формы «меандр», служащие для синхронизации основных узлов ЦВС.

С первым тактовым импульсом в момент  $t_1$  код начальной частоты  $C_i$  из первого регистра памяти записывается в первый цифровой накопитель, код  $D_k$  из третьего регистра памяти – в делитель с переменным коэффициентом деления, а код начальной фазы  $H_j$  из четвертого регистра памяти – в третий цифровой накопитель. Затем с каждым последующим тактовым импульсом, начиная с момента  $t_2$ , код A будет изменяться по формуле

$$A = C_i + T/D_k , (3)$$

Код суммы А из первого цифрового накопителя через второй регистр памяти поступает во второй цифровой накопитель, результат суммирования в котором будет определяться выражением

$$B = AT = C_i T + T^2 / D_k . aga{4}$$

Код *В* поступает на первый вход сумматора, а на второй его вход поступает код  $H_j$ , определяющий смещение начальной фазы  $\varphi_i$ .

Тогда код суммы S на выходе сумматора будет изменяться по формуле

$$S = C_i T + T^2 / D_k + H_i \,. \tag{5}$$

Результат суммирования S из сумматора поступает на вход преобразователя кодов, причем старший разряд суммы SGN является знаковым и подается на вход управления инверсией преобразователя кодов. Остальные N разрядов (где N – разрядность ЦАП) через преобразователь кодов поступают на информационный вход ЦАП.

Если SGN = 0, то на ЦАП поступает прямой код суммы *S*, а если SGN = 1, то обратный код суммы *S*. На выходе ЦАП формируется ступенчатый сигнал «треугольной» формы, который подается на ФНЧ. ФНЧ имеет частоту среза  $f_c = f_0/2$ , где  $f_0$  – тактовая частота ЦВС.

ФНЧ пропускает на выход цифрового синтезатора только первую гармонику сформированного сигнала.

Если ввести обозначения  $f_0 = C_i$  – начальная циклическая частота,  $0.5f' = 1/D_k$  – скорость изменения частоты ЦВС,  $\varphi_j = H_j$  – начальная фаза сигнала,  $T = \Delta t$  – тактовый интервал, то синтезируемый сигнал на выходе ЦВС будет описываться формулой

$$u_{\rm C}(t) = U_0 \Big( f_0 t + f' t^2 + \varphi_j \Big).$$
(6)

где  $U_0$  – амплитуда сигнала на выходе ЦВС.

Таким образом, приведенная структура цифрового синтезатора частотно-модулированных сигналов позволяет формировать сигналы с независимой модуляцией частоты и фазы, при этом параметры сигнала можно изменять при помощи удобного цифрового интерфейса.

Область применения ЦВС: радиолокация, навигация, современные адаптивные системы связи.

#### Цифровой вычислительный синтезатор с быстрой перестройкой частоты

Схема ЦВС представлена на рис. 2. Входы первого, второго и третьего регистров памяти являются цифровыми входами ЦВС, а его аналоговым выходом является выход ФНЧ [6].



Цифровой вычислительный синтезатор работает следующим образом.

Эталонный генератор вырабатывает синусоидальный сигнал опорной частоты, из которого в блоке формирования и задержки формируются тактовые импульсы формы «меандр», служащие для синхронизации основных узлов ЦВС.

На вход первого регистра памяти поступает код  $X_i$  (код множимого), на вход второго регистра памяти поступает код  $Y_i$  (код множителя), на вход третьего регистра памяти поступает код  $D_k$ .

Эти коды записываются следующим образом: код  $X_i$  – в первый счетчик, код  $Y_j$  – во второй счетчик, код  $D_k$  – в делитель с переменным коэффициентом деления.

С первым тактовым импульсом в момент  $t_1$  коды  $X_i$  и  $Y_j$  поступают на входы множимого и множителя умножителя кодов, а начиная со второго тактового импульса – момент  $t_2$ , и далее код произведения P (код частоты ЦВС) в умножителе кодов будет изменяться по формуле

$$P = (X_i + T)Y_j = X_iY_j + Y_jT.$$
<sup>(7)</sup>

Код суммы S в цифровом накопителе (код фазы ЦВС) будет описываться выражением

$$S = X_i Y_j T + Y_j T^2.$$
<sup>(8)</sup>

Если ввести обозначения  $\omega_0 = X_i Y_j$  – начальная циклическая частота,  $\omega' = 0,5Y_j$  – скорость изменения частоты ЦВС,  $T = \Delta t$  – тактовый интервал, то изменение фазы синтезируемого сигнала ЦВС будет описываться формулой

$$\varphi = S = \omega_0 t + \omega' t^2. \tag{9}$$

Код фазы *S* поступает на преобразователь кодов, причем старший разряд *SGN*, являющийся знаковым, поступает на вход управления инверсией преобразователя кодов, а остальные *N* разрядов через преобразователь кодов поступают на информационные входы ЦАП. Если SGN = 0, то на ЦАП поступает прямой код фазы, но если SGN = 1, то обратный код фазы *S*.

Таким образом, на выходе ЦАП формируется ступенчатый сигнал формы «треугольник». После фильтрации в ФНЧ, который имеет частоту среза, равную половину тактовой частоты, на выходе ЦВС формируется сигнал с линейной частотной модуляцией, описываемый формулой

$$u_{\rm C}(t) = U_0 \left( \omega_0 t + \omega' t^2 \right). \tag{10}$$

Делитель с переменным коэффициентом деления 13 служит для задания скорости изменения частоты синтезируемого ЦВС сигнала. Чем больше значение кода  $D_k$ , тем ниже скорость изменения частоты.

Данный ЦВС позволяет формировать не только ЛЧМ-сигнал, но и сигнал с квадратичным законом изменения частоты. Для этого необходимо дать разрешение работы обоих счетчиков.

В первом счетчике код на выходе будет изменяться по формуле  $X = X_i + T$ , а во втором счетчике – по формуле  $Y = Y_i + T/D_k$ .

Тогда частота синтезируемого сигнала ЦВС будет описываться формулой

$$P = (X_i + T)(Y_j + T/D_k) = X_i Y_j + X_i T/D_k + Y_j T + T^2/D_k .$$
(11)

При этом фаза синтезируемого сигнала будет изменяться по формуле

$$S = (X_i + T)(Y_j + T/D_k)T = X_i Y_j T + X_i T^2/D_k + Y_j T^2 + T^3/D_k.$$
 (12)

Таким образом, согласно формуле (12) сигнал на выходе ЦВС будет с квадратичным законом изменения частоты.

Область применения ЦВС – радиолокация, навигация, телекоммуникационные системы, системы дистанционного зондирования атмосферы Земли.

#### Методы построения цифроаналоговых синтезаторов косвенного синтеза с петлей фазовой автоподстройки частоты

Петля фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) наиболее предпочтительна в тех случаях, когда разнос по частоте между соседними гармониками настолько мал, что ни двойное преобразование частоты, ни тем более пассивная фильтрация не в состоянии обеспечить необходимое подавление колебаний нежелательных гармоник [1, 2]. При использовании этого метода отсутствуют побочные составляющие в выходном колебании, поскольку здесь не применяются смесители, умножители и делители частоты. Однако возникает проблема прохождения колебаний нежелательных гармоник через фазовый дискриминатор и буферный усилитель на выход устройства. Величина такого прохождения должна быть оценена или измерена для определения требований, которым должен удовлетворять буферный усилитель.

Необходимо также провести анализ устойчивости петли ФАПЧ, чтобы определить степень фильтрации, которую в состоянии обеспечить эта петля. Поскольку ФАПЧ представляет собой систему второго порядка, стабильность и точность установки частоты не изменяются при прохождении входного колебания через подобный фильтр, но фазовые шумы претерпевают серьезные изменения. В петле ФАПЧ спектр фазовых шумов входного колебания замещается спектром шумов генератора, управляемого напряжением (ГУН), на всех частотах, лежащих за пределами полосы пропускания петли.

Структурная схема цифроаналогового синтезатора на основе ГУН с ФАПЧ приведена на рис. 3. Цифроаналоговый синтезатор работает следующим образом. Опорный генератор вырабатывает синусоидальный сигнал опорной частоты  $f_0$ , который делится в M раз и через делитель частоты поступает на первый вход фазового дискриминатора. Частота ГУН  $f_{\Gamma УH}$  делится N раз в делителе частоты и поступает на второй вход фазового дискриминатора. Сигнал ошибки, вырабатываемый фазовым дискриминатором через ФНЧ подается на управляющий элемент ГУН, который представляет собой колебательный контур со встречно включенными варикапами.

Когда сравниваемые частоты равны, происходит захват в петле ФАПЧ, и частоту выходного колебания ЦАСЧ можно описать формулой

$$f_{\Gamma YH} = f_0 \times N/M . \tag{13}$$



Частота ГУН  $f_{\Gamma YH}$  транспортируется в область более низких частот и сравнивается с опорной частотой  $f_0$ . При малой разности этих частот фазовый дискриминатор вырабатывает медленно изменяющееся напряжение  $U_e$ , которое пропускается через ФНЧ и затем поступает на управляющий элемент ГУН, тем самым осуществляя захват его частоты. В условиях захвата частоты фазовый дискриминатор вырабатывает постоянное напряжение, величина и полярность которого определяются величиной и знаком разности фаз колебаний опорной частоты и транспонированного колебания ГУН.

ФНЧ (часто выполняемый в виде комбинации собственно фильтра и линии задержки) изменяет амплитуду и фазу отдельных проходящих через него колебаний в соответствии с их частотами и тем самым обеспечивает устойчивую работу петли ФАПЧ. При значительной разнице между частотами сравниваемых колебаний на выходе фазового дискриминатора появляется быстро меняющееся напряжение переменного тока, которое эффективно подавляется фильтром, и захвата частоты не происходит.

Обычно петля ФАПЧ используется в качестве фильтра, подавляющего фазовые шумы. Петля ФАПЧ, по существу, может рассматриваться как ФНЧ относительно шумов колебаний опорной частоты и как фильтр верхних частот относительно шумов ГУН, причем в обоих случаях постоянная времени фильтра одна и та же. Уровень подавления обычно составляет 20–30 дБ. Эта особенность петли ФАПЧ играет важную роль при синтезе высоких и ультравысоких частот, где приходится использовать умножение частоты высокой кратности. Она указывает на то, что в петле ФАПЧ спектр шумов колебания опорной частоты замещается спектром шумов ГУН на всех частотах, отстоящих от рабочей больше, чем на полосу пропускания петли. Это свойство петли ФАПЧ объясняет значительное подавление уровня фазовых шумов.

Достоинства цифроаналоговых синтезаторов косвенного аналогового синтеза – высокая спектральная «чистота» формируемых колебаний, возможность синтеза высоких и ультравысоких частот (вплоть до СВЧ-диапазона), низкий уровень фазовых шумов. Если в качестве опорного генератора использовать ЦВС, то можно значительно расширить полосу синтезированных колебаний, умножая частоту сигнала ЦВС.

Область применения цифроаналоговых синтезаторов частот (ЦАСЧ) косвенного синтеза – радиолокация, системы дистанционного зондирования различных сред, современные системы связи, телекоммуникационные системы, телеизмерительные системы, радиоастрономия [3, 5, 7].

Таким образом, в работе проведен сравнительный анализ современных методов синтеза частот и сигналов, на основании чего можно сделать вывод, что наиболее перспективным для радиотехнических систем является метод прямого цифрового синтеза, высокотехнологичный и надежный, с малым шагом по частоте, высокой скоростью перестройки частоты при непрерывности фазы формируемых колебаний, способностью формирования сложных сигналов, хорошей повторяемостью параметров сигналов при тиражировании. Предложены структуры ЦВС сложных широкополосных сигналов, позволяющие синтезировать сигналы с независимой частотной, фазовой и амплитудной модуляцией, причем управление ЦВС осуществляется при помощи удобного цифрового интерфейса.

Благодаря использованию цифроаналоговых синтезаторов косвенного синтеза с более высокой спектральной «чистотой» формируемых колебаний имеется возможность синтеза высоких и ультравысоких частот (вплоть до СВЧ-диапазона). Данные цифроаналоговые синтезаторы с низким уровнем амплитудных и фазовых шумов могут дополнительно подавлять фазовый шум примерно на 30 дБ, что очень важно для ряда решаемых задач.

В общем случае предпочтение тому или иному методу синтеза необходимо отдавать только с учетом всех предъявляемых к системе синтеза частот и сигналов требований, современного состояния технологии и стоимости компонентов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Шапиро Д.Н., Паин А.А. Основы синтеза частот. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.
- 2. Ямпурин Н.П. и др. Формирование прецизионных частот и сигналов. Н.Новгород: ННГТУ, 2003. 187 с.
- 3. Рябов И.В. Цифровой синтез прецизионных сигналов. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 152 с.
- 4. *Рябов И.В.* Методы и средства цифрового синтеза прецизионных сигналов для аппаратуры дистанционного зондирования ионосферы: Автореф. ... дис. д-ра техн. наук. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. 40 с.
- 5. *Рябов И.В.* Цифровые синтезаторы частотно-модулированных сигналов // Приборы и техника эксперимента. 2001. № 2. С. 62–69.
- 6. *Рябов И.В.* Цифровой синтезатор с V-образным законом изменения частоты // Приборы и техника эксперимента, 2006, № 3. С. 88–90.
- 7. *Ryabov I.V.* Digital Synthesizers of Frequency-Modulated Signals // Instruments and Experimental Techniques. 2001. Vol. 44. № 2. P. 62–68.
- 8. *Ryabov I.V.* Digital Calculating Synthesizer with V-shaped Law Of Frequency Change // Instruments and Experimental Techniques. 2006. Vol. 49. № 3. P. 376–378.
- 9. *Рябов И.В.* Метод прямого цифрового синтеза прецизионных сигналов // Радиотехника. 2006. № 9. С. 14–17.
- 10. *Рябов И.В., Юрьев П.М., Толмачев С.В.* Методы повышения быстродействия цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехника. 2013. № 9. С. 46–52.

- 11. Рябов И.В., Юрьев П.М. Рекурсивный синтезатор частот для формирования сигналов с линейной частотной модуляцией //Фундаментальные исследования. 2012. № 9. Ч. 3. С. 685–689.
- 12. Рябов И.В., Юрьев П.М. Метод прямого цифрового синтеза сложных широкополосных сигналов // Вестник МарГТУ. 2007. № 1. С. 11–14
- 13. *Рябов И.В., Юрьев П.М.* Системы синтеза частот и сигналов как основные узлы современных радиоэлектронных средств // Вестник МарГТУ. 2009. № 2. С. 11–15.
- 14. *Рябов И.В., Юрьев П.М.* Цифровой вычислительный синтезатор с V-образным законом модуляции частоты // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сб. тр. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. М.: Изд-во НПО им. А.С. Попова. № 1. С. 250–254.
- 15. *Рябов И.В., Толмачев С.В., Чернов Д.А.* Цифровой вычислительный синтезатор сложных широкополосных сигналов // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 2. С. 88–91.
- 16. *Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Chernov D.A.* Digital Direct Synthesizer of Complex Wideband Signals // Instruments and Experimental Techniques. 2014. Vol. 49. № 2. P. 13–16.
- 17. *Рябов И.В., Стрельников И.В.* Цифровой вычислительный синтезатор многофазных сигналов // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сб. тр. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. Изд-во НПО им. А.С. Попова № 1. С. 153–156.
- 18. *Рябов И.В., Юрьев П.М., Толмачев С.В.* Цифровой синтезатор с расширенным частотным диапазоном // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сб. тр. 14-й Междунар. науч.-техн. конф. Изд-во НПО им. А.С. Попова №2. С. 113–116.
- 19. *Рябов И.В., Юрьев П.М.* Цифровой синтезатор с коррекцией частоты и фазы // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях: Сб. тр. междунар. науч.-техн. семинара. М.: Медиа-паблишер С. 144–146.
- 20. *Рябов И.В., Юрьев П.М.* Цифровой синтезатор частот с расширенным частотным диапазоном // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях: Сб. тр. междунар. науч.-техн. семинара. М.: Медиа-паблишер С. 147–148.

Поступила в редколлегию 4.02.19

# COMPARATIVE ANALYSIS OF DIGITAL AND DIGITAL-TO-ANALOG SYNTHESIZERS

#### I.V. Ryabov, E.S. Klyuzhev, I.V. Strel'nikov, and P.M. Yur'ev

The paper considers the design concept for the frequency and signal synthesis systems constructed on the basis of the indirect analog and direct digital frequency synthesis. Technical characteristics for frequency synthesizers of different design are analyzed and their advantages and disadvantages are revealed. The application domain for the indirect analog frequency synthesis and direct digital frequency is determined.

Keywords: analog synthesis methods, digital direct synthesis methods, digital direct synthesizer, digital frequency and phase accumulator, biased multivibrator, reference generator, delay block, sine converter, code converter, digital to analog converter, low-pass filter, register, trigger, frequency multiplier, frequency divider, amplitude and phase noise, spectral purity of output signal.

**Рябов Игорь Владимирович** – д-р техн. наук (ПГТУ, Йошкар-Ола) E-mail: ryabov22@mail.ru

Клюжев Евгений Сергеевич – аспирант (ПГТУ, Йошкар-Ола) E-mail: klyuz757@bk.ru

Стрельников Игорь Витальевич – аспирант (ПГТУ, Йошкар-Ола) E-mail: str-i-v@yandex.ru

Юрьев Павел Михайлович – аспирант (ПГТУ, Йошкар-Ола) E-mail: pavelyuriev@yandex.ru

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ

## В.Н. Петров, Ю.Ф. Гортышов, Ю.К. Евдокимов, К.А. Левин

Приведен анализ методов расчета течения газожидкостного потока в рабочем участке первичного эталона массового расхода газожидкостных смесей. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитать параметры поршневого режима течения многофазного потока. Рассматриваются условия, позволяющие обеспечить неизменность и передачу единицы измерений газожидкостного потока, поступающего на исследуемое измерительное устройство. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными работами других авторов.

Ключевые слова: эталон, газожидкостный поток, численный метод, метод пограничного слоя, моделирование, поршневой режим.

Сегодня многофазные расходомеры (МФР) являются ключевым инструментом измерения расхода компонент нефтегазоводяного потока на скважинах отечественных месторождений. С целью проведения испытаний, поверки и калибровки МФР в России создан Государственный первичный специальный эталон массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011 (далее – первичный эталон) и эталоны 1 и 2-го разряда (далее – эталоны) [1], а за рубежом многофазные испытательные стенды (МИС) [2]. В соответствии с ГОСТ 8.381-2009 «ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности» эталон должен иметь три взаимосвязанных свойства: неизменность, воспроизводимость и сличаемость. К МИС такие требования не предъявляются. Однако в связи с отсутствием рекомендаций по проектированию как эталонов массового расхода газожидкостных смесей, так и МИС, они по конструктивному исполнению, а следовательно, и по техническим характеристикам мало чем отличаются друг от друга. Это связано с тем, что не существует научно-обоснованных методов и приемов управления структурой течения многофазного потока, поэтому разработчики, исходя из своего понимания процесса воспроизведения и течения как эталонов, так и МИС.

В работе [3] были выявлены и обоснованы методические погрешности, возникающие при работе многофазных испытательных стендов. Методическая погрешность суммируется, начиная от сепаратора, где физически невозможно получить чистые компоненты нефтегазоводяной смеси – нефти (имитатора нефти), воды и газовой фазы (азота или воздуха), поступающей в него после прохождения через МФР.

Рассмотрим, как формируется газожидкостный поток на МИС и эталонах. Одноразовый аппарат перемешивания осуществляет смешение компонент жидкой фазы (нефти или имитатора нефти и воды). Заметим, что одноразовое перемешивание осуществляется в один цикл, т.е. аппарат не обеспечивает циркуляции смеси. Полученная жидкая смесь поступает в аппарат перемешивания жидкой смеси и газа, также конструктивно одноразовый. При течении таких смесей по трубопроводу происходит разделение фаз и скольжение их относительно друг друга. При этом фаза с меньшей плотностью имеет большую скорость, т.е. скорость газовой фазы больше скорости нефти (или имитатора нефти), которая, в свою очередь, больше скорости воды. Возникает методическая погрешность, обусловленная неточностью математического описания течения смеси, а также соотношений, описывающих данное течение. Следовательно, нарушается принцип неизменности воспроизведения газожидкостной смеси, и на исследуемую измерительную систему поступает смесь, отличная от той, которую хотели получить операторы МИС в соответствии с программой испытаний.

Анализ существующих эталонов показывает, что процесс получения газожидкостных смесей в основном происходит в два этапа. На первом этапе происходит перемешивание компонент жидкой фазы (нефти или имитатора нефти и воды). На втором этапе полученная жидкая смесь перемешивается с газовой фазой, как это происходит на МИС. Однако имеются схемы, когда смешение жидкой и газовой фаз происходит в одном аппарате перемешивания.

Возникает вопрос реализации воспроизведения и неизменности структуры течения смеси как после перемешивания компонент жидкой фазы, так и после перемешивания жидкой смеси с газовой фазой. Ранее было сказано, что рекомендаций по проектированию эталонов массового расхода газожидкостной смеси нет и проектировщики должны полагаться на сочетание эмпирической информации и упрощенного анализа различных составных частей комплексной проблемы в целом. Рассмотрим, как осуществляется процесс образования газожидкостной смеси на первичном эталоне.

Перемешивание компонент жидкой фазы на первичном эталоне происходит в специально разработанном аппарате, позволяющем получить гомогенную смесь. Полученная гомогенная смесь поступает на аппарат перемешивания жидкой смеси с газом. При движении гомогенной смеси от аппарата перемешивания расслоения воды и имитатора нефти не происходит. Следовательно, на этом участке смесь неизменна. Представляет интерес течение газожидкостной смеси после аппарата перемешивания гомогенной смеси с газом до исследуемой измерительной системы или МФР. Осуществить прямое моделирование на этом участке невозможно, так как условием выполнения прямого моделирования является наличие единственного безразмерного комплекса, состоящего из одной зависимой и нескольких независимых переменных.

В зависимости от соотношения скоростей течения гомогенной смеси и газовой фазы в рабочем участке первичного эталона возможны пузырьковый, поршневой или расслоенный режимы газожидкостного потока [4]. Разработаем метод расчета, позволяющий рассчитать эти режимы течения.

Математическая модель расчета необходима, так как при трех определяющих критериях, что имеют место в нашем случае, прямое моделирование невозможно, в соответствии с работами [5, 6] требуется экспериментальное исследование и разработка математической модели. Только в этом случае возможно выполнение физического моделирования.

Выберем метод расчета газожидкостного потока. Условно методы расчета можно разделить на два класса:

- методы, основанные на численном решении уравнений Навье – Стокса или Рейнольдса с использованием модели турбулентности;

- метод пограничного слоя.

В связи с бурным развитием вычислительной техники методы расчета струйных течений, основанные на численном решении уравнений Новье – Стокса, получили широкое распространение. Необходимо заметить, что система уравнений Навье – Стокса, разработанная еще в первой половине XIX века, до сих пор является основой теоретических исследований в аэродинамике. Уравнения Навье – Стокса, использующие законы сохранения массы, импульса, энергии в сочетании с основными термодинамическими законами, содержат минимальное количество исходных предположений, что делает их наиболее полной и обоснованной системой уравнений механики жидкости и газа. В то же время с математической точки зрения они составляют самую сложную систему уравнений математической физики.

Численное решение эллиптических уравнений Навье – Стокса требуют дополнительной корректировки, связанной с выбором модели турбулентности, совершенствованием сетки и плотности сетки.

Метод пограничного слоя, или интегральный метод, получил широкое распространение в 70-80-х гг. прошлого века для расчета турбулентных струйных течений в каналах. В приближении пограничного слоя система уравнений Навье – Стокса существенно упрощается ввиду принятия дополнительных допущений. Основными допущениями теории пограничного слоя являются:

- поперечный градиент давления  $\frac{\partial P}{\partial v} \approx 0$ ;

- поперечный градиент скорости, существенно больший продольного  $\frac{\partial U}{\partial y} \gg \frac{\partial U}{\partial x}$ .

Практика показала, что интегральные методы намного проще численных. Они наглядны и позволяют наиболее полно использовать наши знания о происходящих в исследуемом струйном течении физических процессах. Обязательным условием при разработке алгоритма расчета методом пограничного слоя, особенно многофазного струйного течения, имитирующего режимы течения газожидкостного потока в магистрали эталона, является его схематизация.

Для нашего случая предпочтителен метод пограничного слоя. Проведем схематизацию и разработаем метод расчета поршневого режима. Поршневой режим течения представляет собой последовательное прохождение по каналу одиночных больших пузырей, разделенных жидкими пробками, движущимися совместно с пузырями (в дальнейшем будем говорить, что одиночный пузырь и жидкая пробка – единичная ячейка) (рисунок).



Рассматриваемое течение можно описать следующими параметрами: скоростью течения пузыря, профилем скоростей в жидкой пробке и в зазоре между газовым пузырем и стенкой канала, скоростью на оси пробки и у стенки канала, длиной пузыря и изменением давления по длине канала.

Поршневой режим течения условно можно разбить на два участка: 1) течение жидкой фазы (область *CDD'C'*); 2) течение с газовой пробкой (область *DEE'D'*).

Для расчета структуры течения на участке *CEE'C'* (единичной ячейки) сделаем допущения. Влиянием теплообмена и трения со стенками канала пренебрегаем, статическое давление в поперечном сечении единичной ячейки постоянно, при движении пузыря пренебрегаем силами вязкости и поверхностного натяжения.

Для расчета поля течения в области *CDD'C'* единичной ячейки газожидкостного потока воспользуемся уравнениями движения и неразрывности, а также уравнением диффузии, аналогичным уравнению энергии:

$$\rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho \upsilon \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} (y\tau); \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho y U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho y \upsilon) = 0; \qquad (2)$$

$$\sigma U \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \rho \upsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} (y \sigma_D), \qquad (3)$$

где U и  $\upsilon$  – продольная и поперечная составляющая скорости; P – давление;  $\rho$  – плотность;  $\tau$  – касательное напряжение;  $\sigma_D$  – плотность потока массы;  $\phi$  – концентрация газовой фазы.

Для установления связи профиля т с поперечным профилем осредненной скорости воспользуемся гипотезой Буссинеска:

$$\tau = \rho \left( v_T + v \right) \frac{\partial U}{\partial y} , \qquad (4)$$

где v<sub>T</sub> – коэффициент турбулентной вязкости; v – кинематическая вязкость.

Аналогично согласно гипотезе Буссинеска плотность потока массы связана с профилем концентрации соотношением

$$\sigma_D = \left(\frac{\mu_T}{Sc_T} + \frac{\mu}{Sc}\right)\frac{\partial\varphi}{\partial y},\tag{5}$$

где  $\mu_T$  – турбулентная вязкость,  $\mu$  – вязкость;  $Sc_T$  – турбулентное число Шмидта, Sc – молекулярное число Шмидта.

Профиль касательных напряжений  $\tau$  и плотности потока массы  $\sigma_D$  в поперечном сечении канала представим в виде полинома по степеням расстояния от оси канала:

$$\tau = \sum_{n=0}^{3} c_n y^n ; \qquad (6)$$

$$\sigma_D = \sum_{n=0}^{3} c_n y^n \,. \tag{7}$$

Коэффициенты полиномов *c<sub>n</sub>* определим из граничных условий, записанных на оси и у стенки канала.

Решая совместно уравнение (3), (5) и (7), после простых преобразований получим формулу для профиля концентрации газовой фазы в газожидкостном потоке:

$$\frac{\varphi}{\varphi_m} = \left(\frac{\varphi_\delta}{\varphi_m}\right)^{F(\eta_D)},\tag{8}$$

где  $F(\eta_D) = 6\eta_D^2 - 8\eta_D^3 + 3\eta_D^4$ ;  $\eta_D = \frac{y}{\delta}$  – безразмерная поперечная координата; индексы «*m*» и « $\delta$ » соответствуют параметрам на оси и у стенки канала.

Аналогично решая уравнение (1), (2), (4), (6) получим выражение для профиля скорости:

$$\frac{U-U_m}{U_{\delta}-U_m} = 1 - \frac{\int_0^{\eta} \left(\frac{\varphi_{\delta}}{\varphi_m}\right)^{F(\eta_D)} \eta(1-\eta)^2 d\eta}{\int_0^{1} \left(\frac{\varphi_{\delta}}{\varphi_m}\right)^{F(\eta_D)} \eta(1-\eta)^2 d\eta}.$$
(9)

Из уравнений (4) и (9) получим выражение для определения скорости на оси потока:

$$\frac{dU_m}{dx} = -\frac{2(U_m - U_\delta)(v_T + v)\rho_m + A_l\delta^2 \frac{dP}{dx}}{A_l\delta^2 \rho_m U_m},$$
(10)

10

где  $A_{l} = \int_{0}^{l} \left(\frac{\varphi_{\delta}}{\varphi_{m}}\right)^{F(\eta_{D})} \eta \left(1-\eta\right)^{2} d\eta$ .

Аналогично используя уравнение (5) и (8), найдем закон изменения концентрации вдоль оси канала:

$$\frac{d\varphi_m}{dx} = -\frac{24\left(\frac{v_T}{\mathrm{Sc}_T} + \frac{v}{\mathrm{Sc}}\right)\varphi_m \ln \frac{\varphi_\delta}{\varphi_m}}{U_m \delta_D^2}.$$
(11)

Полученные профили концентрации и скорости хорошо согласуются с экспериментами, представленными в работе [7].

Полученная система уравнений замыкается интегральными уравнениями сохранения расхода жид-кой и газовой фаз, а также уравнением количества движения смеси:

$$2\int_{0}^{R} \rho_{*}Uydy = \rho_{*}U_{0}R_{0}^{2}; \qquad (12)$$

$$2\int_{0}^{R} \rho_{\rm r} \varphi U y dy = \varphi_0 \rho_{\rm r} U_0 R_0^2; \qquad (13)$$

$$2\int_{0}^{R} \rho U^{2} y dy + PR^{2} = \rho_{0} U_{0}^{2} R_{0}^{2} + P_{0} R_{0}^{2}, \qquad (14)$$

где индекс «0» соответствует параметрам на входе в канал.

Расчет структуры течения газожидкостной смеси в области *DEE'D'* имеет свои особенности. Основной особенностью течения в данной области является наличие воздушного пузыря длиной  $L_r$ . В работе [8] показано, что при вертикальном движении пузыря его эквивалентный диаметр составляет 60 % диаметра трубы, также указано, что в условиях горизонтального течения скорость дрейфа пузыря, обусловленная действием подъемных сил, равна нулю. Следовательно, проведя аналогию для движения воздушного пузыря в горизонтальной трубе, можно записать, что отношение его диаметра к диаметру канала d / D = 0, 6.

Длину пузыря  $L_{\rm r}$  при хорошем согласовании с экспериментом, как показано в работе [8], можно описать следующей зависимостью:

$$L_{\rm r} = \frac{C_{\rm l} Q_{\rm \pi}}{S_{\rm \kappa}} \,, \tag{15}$$

где  $Q_{\rm n}$  – объем пузыря;  $S_{\rm k}$  – площадь поперечного сечения канала  $\left(S_{\rm k} = \frac{\pi D^2}{4}\right)$ ;  $C_{\rm l}$  – отношение площадей поперечного сечения воздушного пузыря и проточной части канала:

$$C_1 = \frac{S_k}{S_{\pi}},\tag{16}$$

где  $S_{\rm n}$  – площадь поперечного сечения воздушного пузыря  $S_{\rm n} = \frac{\pi d^2}{4}$ .

Для определения величины С1 можно воспользоваться и формулой

$$C_1 = 1 + 1,27 \left( 1 - e^{-3,8(\mu_{\mathcal{K}}\nu_c/\sigma)} \right)^{0,8},$$
(17)

где  $\mu_{*}$  – вязкость жидкой среды;  $v_c$  – приведенная скорость;  $\sigma$  – поверхностное натяжение.

Приведенная скорость определяется соотношением

$$v_c = \frac{Q_r + Q_{\star}}{S_{\star}},\tag{18}$$

где  $Q_{\rm r}$  – объемный расход газа;  $Q_{\rm *}$  – объемный расход жидкости.

Длина единичной ячейки, содержащей жидкую пробу и воздушный пузырь, определяется из зависимости

$$L_{\rm r} + L_{\rm sc} = \frac{Q_{\rm n}}{S_k \alpha},\tag{19}$$

где а – величина объемного газосодержания.

Падение давления для единичной ячейки исследуемого течения, включающей один пузырь и одну жидкую пробку, для всех чисел Рейнольдса имеет вид

$$\Delta p = 2C_f \rho_{*} v_{*}^2 \frac{L_{*} + 8R}{2R}, \qquad (20)$$

из которого после простых преобразований получим изменение давления по длине канала:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{C_f \rho_{\mathsf{m}} v_{\mathsf{m}}}{R} \left( v_{\mathsf{m}} + \frac{8RS_{\mathsf{m}}}{Q_n C_1} v_{\mathsf{m}} \right), \tag{21}$$

где  $C_f$  – коэффициент трения.

Приведенные зависимости (15) – (21) позволяют определить геометрические параметры единичной ячейки и определить структуру потока единичной ячейке поршневого течения.

Параметры течения жидкой фазы по длине  $L_{r}$  определяем, используя уравнения (1) и (2). Как и при расчете структуры пузырькового режима течения в области *CDD'C*, для кольцевого течения жидкости в области *DEE'D* профиль касательных напряжений представим в виде полинома (6). Коэффициенты полинома определим из граничных условий, записанных на границе пузыря и у стенки канала. Для установления связи профиля  $\tau$  с поперечным профилем осредненной скорости воспользуемся гипотезой Бусинеска (4). Решая совместно уравнения (1), (2), (4), (6), получим профиль скорости

$$\frac{U - U_{\delta}}{U_m - U_{\delta}} = 1 - 6\eta^2 + 8\eta^3 - 3\eta^4.$$
(22)
Изменение скорости потока в функции продольной координаты x получим, решая совместно уравнения (4) и (22):

$$dU_m = -\frac{24(v_T + v)\rho(U_m - U_\delta)^2 + \delta^2 \frac{dP}{dx}}{\delta^2 \rho U_m} dx.$$
 (23)

Для замыкания системы уравнений в этой области, как и при расчете пузырькового режима течения, воспользуемся уравнением сохранения расхода и количества движения:

$$\int_{R-r}^{R} Uydy = \int_{R-r}^{R} U_0 ydy , \qquad (24)$$

$$2\int_{R-r}^{R} U^2 y dy + \frac{P}{\rho} \left( R^2 - r^2 \right) = 2\int_{R-r}^{R} U_0^2 y dy + \frac{P_0}{\rho} \left( R^2 - r^2 \right),$$
(25)

где *r* – радиус воздушного пузыря.

Получили замкнутую систему уравнений и для определения структуры течения как в области *DEE'D'*, так и в области *CDD'C'*, т.е. в единичной ячейке поршневого режима течения.

За воздушным пузырем концентрация газовой фазы составляет 16 %. В связи с этим при расчете длины единичной ячейки с помощью соотношения (19) величина объемного газосодержания определяется зависимостью

$$\alpha = 0,84 \frac{Q_{\rm r}}{Q_{\rm r} + Q_{\rm w}} \,. \tag{26}$$

В кольцевом жидком потоке области *DEE'D'* свободного газа практически нет, а содержание растворенного газа на уровне нанопузырьков. Надо заметить, что и в воде, подаваемой по напорным водоводам, всегда содержится некоторое количество воздуха [11].

В работе предложена математическая модель расчета поршневого режима течения. Как было сказано, в рабочем участке первичного эталона возможны также пузырьковый и расслоенный режимы течения. Эти режимы, как и поршневой, можно рассчитать методом пограничного слоя, при этом параметры течения определяются аналогично, с использованием уравнений (1) – (3) и проведением схематизации исследуемого газожидкостного потока.

Наличие на первичном эталоне аппарата перемешивания жидких фаз позволяет создать гомогенную смесь, в результате чего количество критериев сокращается до трех. Наличие экспериментальнотеоретических исследований позволяет обеспечить физическое моделирование в рабочем участке первичного эталона и, как следствие, выполнение ГОСТ 8.381-2009 «ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности» (невозможно осуществить: неизменность, воспроизводимость, сличаемость) и ГОСТ Р 8.637-2013 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений массового расхода многофазных потоков» (если нет автомодельности, то невозможна передача единицы измерения).

В работе излагаются общие принципы анализа физического подобия и его связь с построением физико-математических моделей. Представленные материалы будут полезны научным и инженерным работникам, занимающимся вопросами создания и эксплуатации эталонов массового расхода газожидкостной смеси.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Соловьев В.Г., Евдокимов Ю.К., Петров В.Н., Малышев С.Л. Моделирование воспроизведения и передачи единицы массового расхода газожидкостных смесей от первичного специального эталона ГЭТ 195-2011 // Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. 2016. № 1. С. 96–102.
- 2. *Falcone G., Hewitt G.F., Alimont C.* Multiphase Flow Metering. Principles and Applications. Amsterdam: Elsevier Science, 2009. 328 p.
- 3. Петров В.Н., Соловьев В.Г., Петров С.В., Малышев С.Л. Многофазные испытательные стенды // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2017. № 10. С. 12–15.

4. Петров В.Н. Соловьев В.Г., Малышев С.Л., Петров С.В. Анализ подобия многофазных потоков // Автоматизация, телемеханизация и связи в нефтяной промышленности. 2018. № 2. С. 4–9.

5. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.

6. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физическое моделирование. Новосибирск: Наука, 1986. 296 с.

7. Абрамович Г.Н. и др. Теория турбулентных струй: М.: Наука. Физматлит, 1984. 716 с.

8. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. 440 с.

Поступила в редколлегию 4.02.19

## PHYSICAL MODELING OF GAS-LIQUID FLOWS

#### V.N. Petrov, Yu.F. Gortyshov, Yu.K. Evdokimov, and K.A. Levin

The paper analyzes the methods for calculating the gas-liquid flow in the working section of the primary standard of mass flow rate of gas liquid mixture. The mathematical model that allows calculating the parameters of the piston flow mode of multiphase flow is developed. The self-similarity conditions of a multiphase flow that make it possible to ensure the permanence and transfer of the unit of measurement of the gas-liquid flow entering the measuring device under study are considered. The calculation results are compared with the experimental works of other authors.

Keywords: standard, gas-liquid flow, numerical method, boundary layer method, modeling, piston mode.

**Петров Владимир Николаевич** – канд. техн. наук (ФГУП «ВНИИР», Казань) E-mail: petr vl n@mail.ru

**Гортышов Юрий Федорович** – д-р техн. наук (КНИТУ, Казань) E-mail: jurij.gortyshov@kstu-kai.ru

**Евдокимов Юрий Кириллович** – д-р техн. наук (КНИТУ, Казань) E-mail: evdokimov.riit@kstu-kai.ru

Левин Кирилл Александрович – начальник НИО-9 (ФГУП «ВНИИР», Казань) E-mail: Lkavniir@gmail.com

# ПРЯМОЙ ЦИФРОВОЙ СИНТЕЗ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ, СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯХ

## И.В. Рябов, Н.В. Дегтярев, Е.С. Клюжев, И.В. Стрельников, П.М. Юрьев

Описаны принципы построения цифровых вычислительных синтезаторов, построенных на базе метода прямого цифрового синтеза. Приведены их преимущества по сравнению с цифровыми синтезаторами на основе фазовой автоподстройки частоты, отмечены их достоинства и недостатки. Намечены перспективы развития цифровых вычислительных синтезаторов и их область применения. Представлены функциональные схемы цифровых вычислительных синтезаторов частотно- и фазомодулированных сигналов и структура цифровых синтезаторов частот с коммутацией фазовых отсчетов.

Ключевые слова: прямой цифровой синтез, цифровые вычислительные синтезаторы, цифровые синтезаторы частот, косвенный аналоговый метод синтеза частот и сигналов с фазовой автоподстройкой частоты, цифроаналоговый преобразователь, фильтр низких частот, функциональный преобразователь код-синус, цифровой накопитель частоты, цифровой накопитель фазы, уровень амплитудных шумов, фазовый шум.

#### Введение

В последние десятилетия стремительно развиваются системы радиолокации, связи и телекоммуникации. Важными функциональными узлами современных радиотехнических систем (РТС) являются системы синтеза частот (синтезаторы частот и сигналов), в связи с этим задача формирования сложных широкополосных сигналов крайне актуальна, так как формирование прецизионных сигналов с заданными свойствами обеспечивает высокую разрешающую способность радиолокаторов.

Развитие радиоэлектроники и микропроцессорной техники позволяет в настоящее время создавать аппаратуру со сложными частотно-модулированными и амплитудно-фазоманипулированными сигналами, обладающую высокой разрешающей способностью, помехоустойчивостью, помехозащищенностью, хорошей электромагнитной совместимостью, малыми массогабаритными характеристиками и энергопотреблением.

Современные системы радиолокации и радиосвязи содержат синтезаторы частот и сигналов, которые в основном строятся на основе метода косвенного аналогового синтеза с использованием кольца фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Однако в настоящее время их вытесняют цифровые вычислительные синтезаторы, построенные на базе метода прямого цифрового синтеза.

Основные достоинства цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС) – высокое разрешение по частоте, высокая скорость перестройки частоты, непрерывность фазы при скачках частоты, удобство управления при помощи цифрового интерфейса, возможность независимой модуляции сигнала по амплитуде, частоте и фазе, возможность выполнения в виде отдельной микросхемы (complete DDS), стой-кость к климатическим воздействиям, малые массогабаритные характеристики, хорошая воспроизводимость параметров при тиражировании.

Недостатки ЦВС – недостаточно высокая максимальная частота синтезируемого сигнала, высокий уровень амплитудных шумов, сравнительно высокий уровень побочных спектральных составляющих, что ограничивает область применения ЦВС.

В перспективе возможно появление ЦВС с тактовой частотой опорного сигнала 20 ГГц, разрядностью аккумуляторов частоты и фазы 48 бит или 64 бит и 14 или 16-битным ЦАП, что, по мнению ведущих экспертов, на 98 % удовлетворит потребности в синтезаторах частот для военного и гражданского применения. Данные ЦВС позволят проектировать активные ФАР с высоким разрешением по углу и высокой скоростью сканирования луча, что приведет к значительному улучшению технических характеристик радиолокаторов (РЛС). Важнейшими тенденциями развития систем связи и радиолокации является освоение более высоких частот и переход к использованию сложных широкополосных сигналов для создания новых перспективных РТС с повышенной помехоустойчивостью.

Сложные сигналы широко применяются во многих областях радиотехники – в радиолокации, навигации и связи. Использование сложных сигналов в радиолокации обеспечивает высокую разрешающую способность одновременно по дальности и по скорости, в радиосвязи – повышение помехозащищенности и устойчивости связных систем, в навигации – увеличение точности позиционирования подвижных и неподвижных объектов.

Первыми из сложных сигналов стали применяться радиосигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), которые имеют определенные преимущества перед другими сложными сигналами, а именно: возможность достижения большой девиации частоты и значительной скорости перестройки; сравнительная простота изменения формы огибающей ЧМ сигнала и скорости частотной модуляции для улучшения параметров сжатого сигнала; простота оценки, измерения и коррекции искажений.

ЛЧМ-сигналы используются в качестве базовых при формировании непрерывных частотномодулированных (ЧМ) сигналов треугольной, пилообразной формы либо сигналов с V-, М-образной ЧМ [1–4].

Основы теории и техники методов синтеза частот, заложенные зарубежными исследователями, успешно разрабатывались российскими учеными [2–6].

Вопросам формирования и исследования ЛЧМ-сигналов рассмотрены в работах [5, 7, 8–11] В настоящее время разработаны основные принципы построения ЦВС. Однако на сегодняшний день недостаточно исследованы предельные возможности ЦВС по быстродействию (диапазону синтезируемых частот и скорости перестройки) и «чистоте спектра» формируемых колебаний. Развитие ЦВС в основном идет в рамках известных структурных схем по пути их интегральной реализации, технологического повышения быстродействия, снижения энергопотребления и стоимости [5]. В то же время огромное значение имеет поиск новых способов повышения качественных показателей ЦВС. В первую очередь это относится к быстродействию и «чистоте спектра» формируемых колебаний, так как именно эти параметры остаются неудовлетворительными для ряда практических применений [11–15].

Цель работы заключается в расширении функциональных возможностей цифровых вычислительных синтезаторов, в повышении их быстродействия, повышении «спектральной чистоты» формируемых сигналов, снижении уровня амплитудных шумов.

#### Цифровой синтезатор частотно- и фазомодулированных сигналов

Данный ЦВС (рис. 1) предназначен для синтеза частотно- и фазомодулированных сигналов и может использоваться в системах радиолокации и связи [11, 15–16].

Цифровыми входами синтезатора частот являются входы первого, второго и третьего регистров памяти, а его аналоговым выходом является выход фильтра низких частот (ФНЧ).

Цифровой синтезатор сигналов работает следующим образом.

На вход первого регистра памяти поступает код начальной частоты  $C_i$ , на вход третьего регистра памяти – код  $D_k$ , определяющий коэффициент деления делителя с переменным коэффициентом деления (ДПКД).

Эталонный генератор вырабатывает синусоидальный сигнал опорной частоты, из которого в блоке задержки формируются последовательности прямоугольных импульсов формы «меандр», служащие для синхронизации работы основных узлов цифрового синтезатора.

С первым тактовым импульсом код начальной частоты  $C_i$  через первый регистр памяти записывается в первый цифровой накопитель, а код  $D_k$  – из третьего регистра памяти записывается в ДПКД.

Далее с каждым последующим тактовым импульсом код *A* на выходе первого цифрового накопителя будет изменяться следующим образом:

$$A = C_i + T/D_k . (1)$$

Этот код А поступает на вход второго цифрового накопителя.

Результат накопления суммы во втором цифровом накопителе будет изменяться по формуле

$$S = AT = (C_i + T/D_k)T = C_iT + T^2/D_k.$$
 (2)

Код S поступает на первый вход сумматора, а на второй его вход поступает код фазового сдвига  $H_i$ .



Рис. 1

Код S<sub>2</sub> на выходе сумматора будет описываться формулой

$$S_2 = AT + H_j = (C_i + T/D_k)T + H_j = C_iT + T^2/D_k + H_j.$$
(3)

Код  $S_2$  поступает на преобразователь кодов, причем старший знаковый разряд поступает на вход управления инверсией преобразователя кодов. Если SGN = 0, то на преобразователь кода поступает прямой код суммы, если SGN = 1, то обратный код суммы  $S_2$ .

Далее сигнал суммы S<sub>2</sub> поступает на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), где формируется «ступенчатый» сигнал, который затем подается на ФНЧ, который пропускает на свой выход только первую гармонику синтезированного сигнала. Это сигнал описывается следующей формулой:

$$u_{\rm C}(t) = U_0 \sin\left(2\pi f_0 t + \pi f' t^2 + \varphi_j\right).$$
(4)

Таким образом, в данном ЦВС возможно проводить независимую частотную и фазовую модуляцию в синтезированном сигнале в диапазоне частот 0,1...500 МГц.

Применение данного ЦВС позволит решать задачи по исследованию быстропротекающих динамических процессов, происходящих в ионосфере в условиях сильных магнитосферных и ионосферных возмущений. Данный ЦВС также может быть использован в современных передающих и приемных устройствах для повышения помехозащищенности, скрытности и надежности перспективных систем КВ- и УКВ-связи с программной перестройкой рабочей частоты [15–21].

#### Цифровой синтезатор частот с коммутацией фазовых отсчетов

Цифровой синтезатор частот с коммутацией фазовых отсчетов предназначен для синтеза частотномодулированных сигналов и может использоваться в системах радиолокации, навигации и связи. Цифровой синтезатор частот (рис. 2) работает следующим образом.



Рис. 2

На вход первого регистра памяти поступает код первой начальной частоты  $A_i$ , а на вход второго регистра памяти поступает код второй начальной частоты  $B_i$ .

Эталонный генератор вырабатывает синусоидальный сигнал опорной частоты, из которого в блоке задержки формируются последовательности прямоугольных импульсов формы «меандр», служащие для синхронизации работы основных узлов синтезатора.

По первому тактовому импульсу код первой начальной частоты  $A_i$  переписывается из первого регистра памяти в первый цифровой накопитель, а код второй начальной частоты  $B_j$  – из второго регистра памяти в третий цифровой накопитель. Затем с каждым последующим тактовым импульсом код суммы  $S_1$  на выходе первого цифрового накопителя будет изменяться по формуле

$$S_1 = A_i + T \,. \tag{5}$$

На выходе второго цифрового накопителя сигнал суммирования  $S_2$  будет изменяться по формуле

$$S_2 = (A_i + T)T = A_iT + T^2.$$
(6)

На выходе третьего цифрового накопителя сигнал S<sub>3</sub> будет изменяться по формуле

$$S_3 = B_i + T . (7)$$

На выходе четвертого цифрового накопителя сигнал S4 будет изменяться по формуле

$$S_4 = (B_j + T)T = B_jT + T^2.$$
 (8)

Эти сигналы S<sub>2</sub> и S<sub>4</sub> поступают на входы мультиплексора, а затем поочередно подаются на ЦАП. На его выходе формируется «ступенчатый» сигнал, который поступает на ФНЧ, пропускающий на свой выход только первую гармонику синтезированного сигнала. Если обозначить  $A_i = f_1$  – первая начальная частота,  $B_j = f_2$  – вторая начальная частота, 0,5f' – скорость изменения частоты,  $\Delta t = T$  – длительность тактового интервала, то выходной сигнал ЦСЧ можно описать формулой

$$u_{\rm C}(t) = U_0 \left[ \sin\left(f_1 t + f' t^2\right) + \sin\left(f_2 t + f' t^2\right) \right].$$
(9)

Таким образом, быстродействие цифрового синтезатора частот с коммутацией фазовых отсчетов более чем в 2 раза выше по сравнению с обычными структурами ЦВС, при этом данная структура цифрового синтезатора частот позволяет синтезировать двухчастотный сигнал [16–21].

Таким образом, цифровой вычислительный синтезатор частотно- и фазомодулированных сигналов может применяться для разработки радиоприемных и радиопередающих устройств адаптивных систем КВ- и УКВ-связи: в передатчиках – в качестве возбудителя, в приемнике – в качестве гетеродина приемника. Цифровой синтезатор частот с коммутацией фазовых отсчетов может быть использован в системах радиолокации в качестве опорного генератора в гибридном цифроаналоговом синтезаторе косвенного синтеза с петлей ФАПЧ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Белов Л.А. Радиоэлектроника: Формирование стабильных частот и сигналов. М.: Юрайт, 2018. 254 с.
- 2. Ямпурин Н.П. и др. Формирование прецизионных частот и сигналов: Н. Новгород: НГТУ, 2003. 183 с.
- 3. Рябов И.В. Цифровой синтез прецизионных сигналов. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 152 с.
- 4. *Рябов И.В.* Прямой цифровой синтез сложных широкополосных сигналов в задачах радиолокации, навигации и связи. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. 151 с.
- 5. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
- 6. Радиоприемные устройства / Под ред. Л.Г. Барулина. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
- 7. Кочемасов В.Н., Белов Л.А., Оконешников В.С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. М.: Радио и связь, 1983. 253 с.
- 8. *Рябов И.В.* Цифровые синтезаторы частотно-модулированных сигналов // Приборы и техника эксперимента. 2001. № 2. С. 62–67.
- 9. Иванов В.А., Иванов Д.В., Чернов А.А. Теоретические основы метода прямого цифрового синтеза радиосигналов для цифровых систем связи // Вестник ПГТУ. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2012. № 3. С. 3–34.
- 10. Ридико Л. DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. 2001. № 7. С. 11–17.
- 11. Цифровые радиоприемные системы: Справочник / Под ред. М.И. Жоздишского. М.: Радио и связь, 1990. 208 с.
- 12. *Рябов И.В.* Цифровой синтезатор с V-образным законом изменения частоты // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 3. С. 14–17.
- 13. Рябов И.В. Метод прямого цифрового синтеза сигналов // Радиотехника. 2006. № 9. С. 14–17.
- 14. *Рябов И.В.* Методы и средства цифрового синтеза прецизионных сигналов для аппаратуры дистанционного зондирования ионосферы: Автореф. ... дис. д-ра техн. наук. Казань: Издво Казан. гос. техн. ун-та, 2006. 40 с.
- 15. Цифровой синтезатор частот: пат. 2149503 Рос. Федерация, № 99107900/09; заявл. 13.04.1999; опубл. 20.05.2000, Бюл. № 14.
- 16. Цифровой синтезатор частотно- и фазомодулированных сигналов: пат. Рос. Федерация, № 2007120371/09; заявл. 31.05.2007; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 16.
- 17. Цифровой синтезатор частот с коммутацией фазовых отсчетов: пат. 2346381 Рос. Федерация, № заявл. 18.06.2007; опубл. 10.02.2009. Бюл. № 4.
- 18. Цифровой синтезатор фазомодулированных сигналов: пат. 2490789 Рос. Федерация, № 2012130718/08; заявл. 18.07.2012. опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23.
- 19. Цифровой синтезатор частотно-модулированных сигналов: пат. 2166833 Рос. Федерация, № 2000103304/09; заявл. 9.02.2000; опубл. 10.05.2001, Бюл. № 13.
- Цифровой синтезатор фазомодулированных сигналов: пат. 2204196 Рос. Федерация, № 2001106889/09; заявл. 13.03.2001; опубл. 10.05.2003, Бюл. № 13.
- 21. Цифровой синтезатор частотно-модулированных сигналов: пат. № 2204197 Рос. Федерация, № 2001109398/09; заявл. 06.04.2001; опубл. 10.05.2003, Бюл. № 13.

Поступила в редколлегию 5.02.19

# DIRECT DIGITAL SYNTHESIS OF BROADBAND SIGNALS IN RADIOLOCATION, COMMUNICATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

## I.V. Ryabov, N.V. Degtyarev, E.S. Klyuzhev, I.V. Strel'nikov, and P.M. Yur'ev

The paper describes principles of designing the direct digital synthesizers based on the direct digital synthesis. Their advantages in comparison with digital synthesizers based on the phase-locked loop are presented. Prospects for the development of direct digital synthesizers and the sphere of their application are shown. Functional diagrams of direct digital synthesizers of frequency-and phase-modulated signals and the structure of digital synthesizers with phase sample commutation are presented.

Keywords: direct digital synthesis, direct digital synthesizers, digital frequency synthesizers, indirect analog method of synthesis of frequencies and signals with PLL, DAC, LPF, function converter code-sine, digital frequency storage, digital phase storage, amplitude noise level, phase noise.

**Рябов Игорь Владимирович** – д-р техн. наук (ПГТУ, Йошкар-Ола) E-mail: ryabov22@mail.ru

Дегтярев Николай Васильевич - аспирант (ПГТУ, Йошкар-Ола) E-mail: dn32@mail.ru

Клюжев Евгений Сергеевич – аспирант (ПГТУ, Йошкар-Ола) E-mail: klyuz757@bk.ru

**Стрельников Игорь Витальевич** – аспирант (ПГТУ, Йошкар-Ола) E-mail: str-i-v@yandex.ru

Юрьев Павел Михайлович - аспирант (ПГТУ, Йошкар-Ола) E-mail: pavelyuriev@yandex.ru

# ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОТОКАХ ГАЗА И ЖИДКОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ОДНОМЕРНЫМ КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННЫМ ДАТЧИКОМ

#### Х.С.А. Мохаммед

Предлагается прибор, предназначенный для измерения температурных полей с помощью полупроводникового одномерного распределенного датчика. Описывается устройство измерительного прибора на уровне структурной схемы и его программное обеспечение. Приводятся формулы для расчета параметров отдельных блоков. Рассмотрен пример практической реализации предлагаемого прибора. Приводятся результаты испытания прибора совместно с дискретным одномерным распределенным датчиком.

Ключевые слова: распределенный датчик, полупроводниковая структура, измерительный алгоритм, температурное поле, измерительный прибор.

#### Метод измерения

Применение полупроводникового одномерного распределенного датчика (ПП ОРД) в измерении температурных полей привлекательно в связи с его несомненными преимуществами по сравнению с традиционными средствами измерения [1].

В предыдущих работах, например [1–5], подробно изложены теоретические основы ПП ОРД: устройство, схема включения, измерительный алгоритм. Однако применение ПП ОРД невозможно без вторичной электронной измерительной аппаратуры (измерительного прибора), которой до настоящего времени практически не уделялось внимания.

Измерительный прибор, предлагаемый в настоящей работе, должен обеспечивать следующее:

1) электрическое измерение зависимостей входного тока  $I_S(U_0)$  и дифференциальной входной проводимости  $G_S(U_0)$  ПП ОРД, включенного, как показано на рис. 1, *a*, на некоторой дискретной сетке напряжений  $U_{0m}$ ,  $m = \overline{1, M}$  в диапазоне  $U_0 \in [0, E_0]$  [2, 3];

2) вычисление значений температуры  $T_n$  на дискретной координатной сетке  $x_n$ ,  $n = \overline{1, N}$  в соответствии с измерительным алгоритмом [4], структурная схема которого показана на рис. 1,  $\delta$ .



Под дифференциальной входной проводимостью ПП ОРД понимается отношение

$$G_S = I_{Sm} / U_m , \tag{1}$$

где  $I_{Sm}$  – амплитуда переменной составляющей тока  $I_S$ ;  $U_m$  – амплитуда источника переменного напряжения (см. рис. 1, *a*).

Амплитуда переменного напряжения  $U_m$  выбирается малой (порядка 10 мВ), чтобы проводимость  $G_S$  оказывалась линейной по отношению к данному воздействию. Величина постоянного напряжения  $E_0$ 

задает крутизну распределения потенциала вдоль по длине ПП ОРД и определяет ее пространственную разрешающую способность  $\Delta x$ , которая оценивается по формуле [1, 2]

$$\Delta x \approx L \varphi_T / E_0 , \qquad (2)$$

где  $\phi_T = kT/e$  – температурная разность потенциалов pnp-перехода; *L* – длина ПП ОРД.

## Устройство измерительного прибора

Измерительный прибор состоит из двух отдельных блоков:

- электронный аналого-цифровой блок измерения зависимостей  $I_S(U_0)$  (см. рис. 1, *a*) и  $G_S(U_0)$  (1);

- вычислительное устройство (персональный компьютер), в котором программно реализуется измерительный алгоритм (см. рис. 1, б).

Информационная связь между блоками и питание измерительного блока осуществляется через интерфейс USB.

Структурная схема блока измерения  $I_{S}(U_{0})$  и  $G_{S}(U_{0})$  показана на рис. 2. Номера клемм для подключения ПП ОРД соответствуют схеме на рис. 1,  $\delta$ .



Принцип работы измерительного блока заключается в следующем. Суммарное напряжение  $U_0$  и  $U_m$  (см. рис. 1, *a*), подаваемое на вывод 1 ПП ОРД, формируется в сумматоре С взвешенным сложением выходных сигналов цифроаналоговых преобразователей ЦАП1 и ЦАП2. Формирование медленно меняющегося напряжения в ЦАП1 и гармонического напряжения в ЦАП2 осуществляется устройством управления УУ.

Ток I<sub>S</sub>, протекающий через вывод 3 ПП ОРД, преобразовывается в напряжение

$$U_{IS} = I_S R_{\rm T} \,, \tag{3}$$

где  $R_{\rm T}$  – сопротивление токосъемного резистора. Напряжение  $U_{IS}$  усиливается усилителем постоянного напряжения У1 и усилителями переменного напряжения У2, У3, У4 с разными коэффициентами усиления. Использование нескольких усилителей переменного напряжения позволяет расширить динамический диапазон измерения [6]. Цифровое измерение выходных сигналов У1, У2, У3, У4 и ЦАП2 осуществляется под управлением УУ по традиционной схеме: аналоговый коммутатор АК, устройство выборкихранения УВХ и аналого-цифровой преобразователь АЦП. Вычисление зависимостей  $I_S(U_0)$  и  $G_S(U_0)$  в виде трех K-мерных векторов с элементами  $U_{0k}$ ,  $I_{Sk}$ ,  $G_{Sk}$ ,  $k = \overline{1, K}$  и их передача в ПК через USB-интерфейс выполняется УУ.

В преобразователе напряжения DC/DC формируются необходимые напряжения для питания блоков и гальванически изолированное постоянное напряжение  $E_0$ , подаваемое между выводами 1 и 2 ПП ОРД.

Структурные блоки АК, УВХ, АЦП, ЦАП1, ЦАП2, УУ и USB (см. рис. 2) целесообразно реализовать на базе недорогого микроконтроллера (МК), например, STM32F303 производства STMicroelectronics. Дан-

ный МК является 32-битным и содержит все перечисленные блоки, номинальное напряжение питания равно 3,3 В. 12-разрядные АЦП и ЦАП могут работать с частотой до 1 MSPS, динамический диапазон аналоговых сигналов – 0...3,3 В. В составе ядра МК имеются аппаратные умножитель и делитель, что важно для сложных вычислений в реальном времени.

Усилитель постоянного напряжения У1 должен обладать низким уровнем входных токов и малым напряжением смещения. Данный блок следует выполнить на основе операционного усилителя (ОУ), включенного по схеме неинвертирующего усилителя с постоянным смещением выходного напряжения 1,65 В. В качестве ОУ можно порекомендовать интегральную микросхему (ИМС) AD822 производства Analog Devices. Данная ИМС ОУ обладает следующими параметрами: напряжение питания –  $\pm$ (2,5...15) В; максимальный входной ток – 25 пА; напряжение смещения – 0,8 мВ; температурный дрейф напряжения смещения – 2мкВ/°С.

Усилители У2, У3, У4 и сумматор С могут быть выполнены на базе ОУ общего назначения. В качестве примера можно порекомендовать ИМС LM2902 производства STMicroelectronics. Данная ИМС содержит 4 ОУ со следующими параметрами: напряжение питания – ±(1,5...15)В; напряжение смещения – 2мВ; температурный дрейф напряжения смещения – 7мк В/°С, полоса пропускания 1,8 МГц.

Коэффициенты усиления усилителей рассчитываются с учетом динамического диапазона АЦП по следующим формулам:

$$K_{\rm y1} = \frac{1,6B}{\left|I_{S}\right|_{\rm max} R_{\rm T}};\tag{4}$$

$$K_{\rm Y2} = \frac{1,6B}{G_{S\,\rm max}R_{\rm T}U_mK_{\rm Y1}};\tag{5}$$

$$K_{y_3} = K_{y_2} \left( G_{S \max} / G_{S \min} \right)^{1/3};$$
(6)

$$K_{y4} = K_{y3} \left( G_{S \max} / G_{S \min} \right)^{1/3};$$
(7)

где  $R_{\rm T}$  – сопротивление токосъемного резистора;  $|I_S|_{\rm max}$  – максимальное значение модуля тока  $I_S$ ;  $G_{S\min}$  и  $G_{S\max}$  – минимальное и максимальное значения входной дифференциальной проводимости ПП ОРД;  $U_m$  – амплитуда переменной составляющей выходного напряжения сумматора С.

Коэффициенты передачи сумматора С по каждому входу с учетом динамического диапазона ЦАП рассчитываются по формулам

$$K_{\rm C1} = E_0/3, 3\rm B$$
; (8)

$$K_{\rm C2} = U_m / 1,6{\rm B}$$
. (9)

Сопротивление токосъемного резистора  $R_{\rm T}$  выбирается таким, чтобы падение напряжения  $U_{IS}$  (3) практически не влияло на режим ПП ОРД, но было измеримым. По мнению автора, с учетом (2), данные условия сводятся к неравенству

$$R_{\rm r} \left| I_S \right|_{\rm max} < \varphi_T \,. \tag{10}$$

Нарушение условия (10) приведет к изменению распределения напряжения вдоль по длине ПП ОРД на величину, превышающую  $\phi_T$ .

#### Программное обеспечение измерительного прибора

Предлагаемый измерительный прибор содержит два программируемых устройства: МК в составе измерительного блока и ПК.

Программное обеспечение МК организовывает измерение и передачу в ПК набора значений среднего тока  $I_{Sk}$  и дифференциальной входной проводимости  $G_{Sk}$  ПП ОРД при K разных напряжениях  $U_{0k}$ :  $k = \overline{1, K}$ ,  $U_{01} = 0$ ,  $U_{0K} = E_0$ ,  $U_{0k} = U_{0k-1} + E_0/(K-1)$ .

Для измерения  $G_{Sk}$  на выходе ЦАП2 непрерывно генерируется гармонический сигнал с дискретными отсчетами

$$U_{\text{IIA}\Pi 2\,i} = 1,65\text{B} + (U_m/K_{\text{C2}})\cos(2\pi f_0 i T_S), \qquad (11)$$

где  $K_{C2}$  – коэффициент передачи сумматора по каналу  $U_m$  (9);  $f_0$  – частота колебаний;  $T_s$  – период дискретизации; i – номер отсчета. После формирования каждого отсчета  $U_{\text{ЦАП2}i}$  производится измерение напряжений на входах АК:  $U_{\text{ЦАП2}i}$ ,  $U_{y_1i}$ ,  $U_{y_2i}$ ,  $U_{y_3i}$ ,  $U_{y_4i}$ .

Процесс измерения при каждом значении индекса *k* сводится к последовательному выполнению следующих операций.

1. На выходе ЦАП1 формируется напряжение  $U_{\text{ЦАП1}k} = U_{0k} / K_{\text{C1}}$ , где  $K_{\text{C1}}$  – коэффициент передачи сумматора по каналу  $U_0$  (8).

2. Ожидается завершение переходного процесса в ПП ОРД, т.е. стабилизация среднего значения тока  $I_s$ , вычисляемого по формуле

$$I_{S \, cp} = \sum_{i=1}^{N_S} \left( U_{y_1 i} \right) / \left( N_S K_{y_1} R_T \right), \tag{12}$$

где  $N_S = 1/(f_0 T_S)$  – число отсчетов в одном периоде гармонического сигнала. Установившееся (последнее) значение  $I_{S cp}$  сохраняется как значение среднего тока  $I_{S k}$ .

3. Вычисляются амплитуды квадратурных составляющих и полные амплитуды выходных переменных напряжений ЦАП2, У2, У3, У4

$$a_{\text{IIAII2, Y2, Y3, Y4}} = \frac{2}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} \left( U_{\text{IIAII2, Y2, Y3, Y4}i} \cos\left(\frac{2\pi i}{N_S}\right) \right);$$
(13)

$$b_{\text{IIAII2, V2, V3, V4}} = \frac{2}{N_S} \cdot \sum_{i=1}^{N_S} \left( U_{\text{IIAII2, V2, V3, V4}i} \sin\left(\frac{2\pi i}{N_S}\right) \right); \tag{14}$$

$$U_{m\,\text{IIA}\Pi2,\,\text{V2},\,\text{V3},\,\text{V4}} = \sqrt{a_{\text{IIA}\Pi2,\,\text{V2},\,\text{V3},\,\text{V4}}^2 + b_{\text{IIA}\Pi2,\,\text{V2},\,\text{V3},\,\text{V4}}^2} \,. \tag{15}$$

4. Вычисляются амплитуды квадратурных составляющих *a*<sub>IS</sub> и *b*<sub>IS</sub> переменного тока через ПП ОРД. Для этого из каналов У2, У3 и У4 выбирается канал с наибольшей амплитудой выходного сигнала, находящегося в пределах динамического диапазона АЦП. С учетом (4) – (7) получим

$$a_{IS} = \begin{cases} a_{y4}/(K_{y4}R_{T}), & U_{m y4} < 1,6B; \\ a_{y3}/(K_{y3}R_{T}), & U_{m y3} < 1,6B; & U_{m y4} \ge 1,6B; \\ a_{y2}/(K_{y2}R_{T}), & U_{m y3} \ge 1,6B; & U_{m y4} \ge 1,6B; \end{cases}$$
(16)

$$b_{IS} = \begin{cases} b_{y4} / (K_{y4}R_{T}), & U_{m y4} < 1,6B; \\ b_{y3} / (K_{y3}R_{T}), & U_{m y3} < 1,6B; & U_{m y4} \ge 1,6B; \\ b_{y2} / (K_{y2}R_{T}), & U_{m y3} \ge 1,6B; & U_{m y4} \ge 1,6B. \end{cases}$$
(17)

5. Вычисляются активные составляющие тока и входной проводимости ПП ОРД по формулам

$$I_{Sa} = (a_{IS}a_{IIA\Pi 2} + b_{IS}b_{IIA\Pi 2})/U_{m IIA\Pi 2};$$
(18)

$$G_{Sk} = I_{Sa} K_{C2} / U_{m \, \text{IJA}\Pi 2} \,. \tag{19}$$

Программное обеспечение ПК осуществляет получение от измерительного блока K значений среднего тока  $I_{Sk}$  и дифференциальной входной проводимости  $G_{Sk}$  ПП ОРД при разных напряжениях  $U_{0k}$  и вычисление значений температуры  $T_n$  на дискретной координатной сетке  $x_n$ ,  $n = \overline{1, N}$ .

Структурная схема алгоритма вычисления *T<sub>n</sub>* показана на рис. 1, *б*. Вычисление производится по итеративной схеме

$$T_n^{(i+1)} = T_n^{(i)} + \delta T_n^{(i)}, \qquad (20)$$

где *i* – номер итерации.

N-мерный вектор итеративной поправки  $\|\delta \mathbf{T}\|^{(i)}$  с элементами  $\delta T_n^{(i)}$  находится из системы линейных алгебраических уравнений

$$\|\mathbf{S}\|^{(i)} \|\mathbf{\delta}\mathbf{T}\|^{(i)} = \|\mathbf{\delta}\mathbf{G}_{\mathbf{S}}\|^{(i)}, \qquad (21)$$

где  $\|\mathbf{S}\|^{(i)}$  – матрица чувствительности размерностью  $M \times N$ ;  $\|\mathbf{\delta G_S}\|^{(i)} - M$  -мерный вектор с элементами

$$\delta G_{Sm}^{(i)} = G_{Sm}^{(i)} - G_{SMOJm}^{(i)} .$$
<sup>(22)</sup>

Элементы матрицы  $\|\mathbf{S}\|^{(i)}$  вычисляются по формуле.

$$s_{mn}^{(i)} = \frac{G_{S \text{ MOД } m} \left( T_1^{(i)}, \dots, T_{n-1}^{(i)}, T_n^{(i)} + \Delta T, T_{n+1}^{(i)}, \dots, T_N^{(i)} \right) - G_{S \text{ MOД } m} \left( T_1^{(i)}, \dots, T_{n-1}^{(i)}, T_n^{(i)} - \Delta T, T_{n+1}^{(i)}, \dots, T_N^{(i)} \right)}{2 \cdot \Delta T}, \quad (23)$$

где  $\Delta T$  – малое локальное приращение температуры.

Вычисление входной проводимости модели ПП ОРД *G*<sub>S МОД *m*</sub>, необходимой в (22) и (23), производится с использованием градуировочной характеристики ПП ОРД по методике [4].

## Пример практической реализации измерительного прибора

Измерительный прибор практически реализован в виде аппаратно-программного комплекса для проведения экспериментальных исследований ПП ОРД. Исследуемый ПП ОРД (рис. 3) выполнен в виде цепной схемы, состоящей из дискретных резисторов в SMD-корпусе 0805 ( $R_0 = 100 \text{ Om}$ ) и встречно-последовательно включенных диодов  $D_1 - D_9$  типа BAV70 в SMD-корпусе SOT23.



Диоды для ПП ОРД предварительно подобраны по градуировочным характеристикам – температурным зависимостям вольт-амперных характеристик, измеренным в диапазоне 20...80 °C на автоматизированном стенде авторской разработки [7]. Полученные характеристики в табличной форме занесены в программное обеспечение ПК. Разброс ВАХ отобранных диодов составляет не более 8 %, обратный ток насыщения в указанном диапазоне температур изменяется в диапазоне приблизительно 6 нА...0,8 мкА.

При практической реализации прибора параметры сигналов и отдельных блоков выбраны равными:

- амплитуда переменного напряжения, подаваемого на ПП ОРД,  $U_m = 16 \text{ мB}$ ;

- постоянное напряжение, подаваемое между концами ПП ОРД,  $E_0 = 10 \text{ B}$ ;
- сопротивление токосъемного резистора  $R_{\rm T} = 10 \, {\rm kOm}$ ;
- коэффициенты усиления усилителей  $K_{y_1} = 16$ ;  $K_{y_2} = 40$ ;  $K_{y_1} = 200$ ;  $K_{y_1} = 1000$ ;
- коэффициенты передачи сумматора по разным входам  $K_{C1} = 3$  и  $K_{C2} = 0,01$ ;

В ходе испытания прибора дискретный ПП ОРД помещался в неизотермический поток газа, создаваемый в необдуваемом пространстве над электронагревательным элементом с мощностью 40 Вт. Одновременно температура потока вблизи диодов  $D_1 - D_9$  контролировалась термопарой типа К, подключенной к цифровому мультиметру DT-5807. Результаты измерения температурного поля с помощью ПП ОРД  $T_{\text{ОРД}}$  и контрольной термопарой  $T_{\text{ТП}}$  приведены в таблице. Видно, что температуры, измеренные с помощью ПП ОРД и термопарой, отличаются не более чем на 6 °C. Такое отличие может быть вызвано, скорее всего, различием в нагреве диодов ПП ОРД и контрольной термопары.

Наименование датчика	Номер точки измерения								
измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Т</i> <sub>ОРД</sub> , °С	33	40	43	44	42	37	31	26	24
$T_{ m T\Pi}$ , °C	30	35	38	39	37	33	27	23	22
$\Delta T = T_{\rm OPA} - T_{\rm TII} ,  ^{\circ}{\rm C}$	3	5	5	6	5	4	4	3	2

В работе предложен прибор для контроля и измерения температурных полей в неизотермических потоках газа с помощью полупроводникового одномерного распределенного датчика. Данный прибор состоит из аналого-цифрового измерительного блока и ПК. Приведенные структурная схема измерительного блока, расчетные формулы, описание программного обеспечения, а также рекомендации по выбору элементной базы дают возможность практической реализации прибора. По результатам испытания макетного образца прибора совместно с дискретным распределенным датчиком можно судить о целесообразности внедрения прибора и метода измерения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Евдокимов Ю.К.* Распределенные измерительные среды: Автореф... дис. д-ра техн. наук. Казань: Изд-во Казан гос. техн. ун-та, 1995. 35 с.
- 2. *Храмов Л.Д., Евдокимов Ю.К.* Одномерный распределенный датчик на основе полупроводниковой pnp-структуры // Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение: Тр. 2-й рос.-белорус. науч.-техн. конф. им. О.В. Лосева. Нижний Новгород, 2015. С. 389–391.
- 3. Евдокимов Ю.К., Храмов Л.Д., Мохаммед Х.С. Полупроводниковый одномерный распределенный датчик физического поля // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы 10-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. С. 120–121.
- Мохаммед Х.С.-А., Храмов Л.Д., Евдокимов Ю.К. Измерительный алгоритм для одномерного распределенного датчика на основе нелинейной структуры // Нигматуллинские чтения-2018: Тез. докл. междунар. науч. конф. Казань: Изд-во АН РТ, 2018. Т. 1. С. 71–73.
- 5. *Мохаммед Х.С.А.* Исследование одномерного распределенного датчика на основе полупроводниковой структуры // Нигматуллинские чтения-2018: Тез. докл. междунар. науч. конф. Казань: Изд-во АН РТ, 2018. Т. 1. С. 68–70.
- 6. *Martemianov S., Evdokimov Yu.K.* Continuously distributed sensors for steady-state temperature profile measurements: main principles and international numerical algorithm // Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. Vol. 47. № 2. C. 329–340.
- 7. Воробьев А.С. Евдокимов Ю.К., Храмов Л.Д., Мохаммед Х.С.А. Стенд для градуировки чувствительных элементов распределенного датчика температурных полей // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы 10-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. С. 122–123.

Поступила в редколлегию 6.02.19

# DEVICE FOR CONTROL AND MEASUREMENT OF TEMPERATURE FIELD IN NON-ISOTHERMAL GAS AND LIQUID FLOWS BY A SEMICONDUCTOR ONE-DIMENSIONAL QUASISTATIC DISTRIBUTED SENSOR

## Kh.S.A. Mohammed

This paper proposes a device designed to measure the temperature fields by means of a semiconductor one-dimensional distributed sensor. The layout of the measuring device at the level of the block diagram and its software are described. Formulas for calculating the parameters of individual blocks are given. An example of the practical implementation of the device being proposed is considered. The results of testing the device together with a discrete one-dimensional distributed sensor are given.

Keywords: distributed sensor, semiconductor structure, measuring algorithm, temperature field, measuring device

Мохаммед Халил Султан Абдулла – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: khalil.mohammed@mail.ru

# ИНТЕГРАТОРЫ ДИСКРЕТНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ УСТРОЙСТВ СОВРЕМЕННЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## И.А. Горбунов, Ф.А. Карамов, С.А. Старцев

Рассмотрены вопросы реализации функционально завершенных электронно-измерительных устройств, использующих интеграторы дискретного действия на основе суперионных проводников постоянного состава.

Ключевые слова: суперионные проводники, интегрирующие элементы, интеграторы дискретного действия, измерительные устройства.

Рассмотрено применение интегрирующих элементов на основе суперионных проводников – интеграторов дискретного действия (ИДД) при разработке новых методов измерения и контроля параметров различных физических процессов, а также вопросы создания устройств измерения и определения потребления тепловой энергии локальными отопительными приборами, энергии термоэлектрогенераторов, эффекта перемещения и выявления усталости конструкций.

#### Экспериментальная часть

Совмещение активного датчика и интегратора дискретного действия позволяет получить измерительное устройство, подробно описанное в работах [1–3].

Заряд интегратора дискретного действия *Q* в этом случае пропорционален интегралу изменения физической величины:

$$Q = \int_{0}^{\tau} I_{W}(t)dt = \frac{1}{R} \int_{0}^{\tau} E(t)dt = \frac{k}{R} \int_{0}^{\tau} m(t)dt , \qquad (1)$$

где m(t) – физическое воздействие; E(t) – напряжение; R – токозадающее сопротивление;  $I_W(t)$  – ток записи, который за определенное время записи  $t_W$  интегрируется по входной физической величине, хранит ее значение и при необходимости считывается.

Алгоритмы работы известных измерительных систем для определения потребляемой тепловой энергии примерно одинаковые. В основном они базируются на определении расхода теплоносителя, температуры на входе и выходе системы. Например, в измерителях [4, 5] масса теплоносителя  $G_{\rm pac}$  определяется по соотношениям

$$g_{\rm pac} = (Af + B)\rho_T / 1000; \ G_{\rm pac} = (g_{\rm pac}t) / 3600,$$
 (2)

где *A* и *B* – паспортные градуировочные преобразователи расхода; f – частота опроса, Гц;  $\rho_T$  – плотность теплоносителя при заданной температуре, кг/м<sup>3</sup>; t – время, отсчитанное в конце измерения, с;  $g_{pac}$  – массовый расход теплоносителя в подающем трубопроводе, кг/ч.

Значения плотности и энтальпии теплоносителя в зависимости от его температуры обычно определяются из таблицы «Плотность, вязкость и энтальпия воды» Госстандарта России 1993 г. Данные табл. 1, за исключением значения теплоемкости, приведены для давления 0,61 МПа.

							Таблица 1
Свойство воды	Значение показателя						
Температура, °С	150	90	80	70	42	32	22
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	917,05	965,5	971,97	977,94	991,61	995,2	997,95
Энтальпия, кДж/кг	632,08	377,27	335,28	293,37	176,26	134,52	92,67
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	4,313	4,208	4,195	4,187	4,174	4,174	4,185

Далее определяют расход тепловой энергии *W*<sub>рас</sub>, кДж, по соотношению

$$W_{\rm pac} = G_{\rm pac} \left( h_{\rm n} - h_{\rm o} \right) \,, \tag{3}$$

где *h*<sub>п</sub>, *h*<sub>0</sub> – энтальпия воды в подающем и обратном трубопроводах; кДж/кг.



Рис. 1. Измерение потребления тепловой энергии отопительными приборами

Анализ известных систем (рис. 1) измерения энергопотребления отопительными приборами позволяет сделать основные выводы.

Предлагаемые измерительные системы предназначены для определения тепловой энергии, потребляемой отдельными домами, достаточно большими, отапливаемыми центральной системой объектами и промышленными предприятиями.

Измерительные устройства устанавливаются отдельно к каждой отопительной системе и монтируются в систему трубопровода отопительной системы.

Для регистрации и хранения информации требуются источники электрического питания и резервные элементы для учета различных аварийных ситуаций.

Данные системы являются достаточно сложными измерителями тепловой энергии для пользователя с точки зрения установки, настройки и поверки достоверности получаемых результатов измерений.

При варианте использования принятой методики, известных систем и устройств для измерения тепловой энергии локальных отопительных приборов возникает необходимость устанавливать к каждому конвектору или радиатору дорогостоящее устройство электронной регистрации, с которого информация передается на центральный пульт сбора информации. При этом возникают принципиальные моменты, которые усложняют их практическую реализацию. Это относится к вопросу точного измерения разности температуры в подающем и отводящем трубопроводах конвекторов и радиаторов, которое может составлять всего 1-2 °C и менее. Очевидно при этом, что требуемая точность определения температуры в единицы процентов предъявляет требования к измерению температур в сотые доли градуса. При измерении расхода при существующем многообразии разводки в домах возникают непреодолимые трудности для точного его определения для отдельной квартиры.

В работе [6] приведены результаты исследований по технической реализации алгоритма теплоотдачи и теплопередачи, когда для практических расчетов стационарных процессов с заданными граничными условиями применимы соотношения [7]:

$$W(t) = \theta t = \alpha \left( T_S - T_0 \right) St;$$
  

$$W(t) = \theta t = k \left( T_S - T_0 \right) St,$$
(4)

где W(t) – количество тепловой энергии, отданной средой с более высокой температурой, Дж;  $\theta$  – тепловой поток, Вт;  $T_S$ ,  $T_0$  – средняя температура поверхности тела и характерная температура окружающей среды, К;  $T_{01}$ ,  $T_{02}$  – характерные температуры греющей и обогреваемой сред, разделенных перегородкой, К; *S* – расчетная площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>; *t* – время протекания процесса, с. Множители пропорциональности  $\alpha$  и *k*, Вт/(м<sup>2</sup>·K), представляют коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи. Формулы (3) отражают тот важный факт, что коэффициенты  $\alpha$  и *k* значительно слабее зависят от разности температур и размеров поверхности теплообмена, чем тепловой поток  $\theta$ .

Предложенные и реализованные в работе [6] новый способ и устройство позволяют определить количество тепловой энергии, расходуемой отопительными приборами, и провести измерения количества потребляемой тепловой энергии в системах теплоснабжения отдельных комнат, квартир, зданий и предприятий (рис. 2).

При этом реализуется следующий алгоритм измерений.

Заданные размеры конкретного конвектора или нагревательного элемента позволяют определить площадь S в соотношениях (3).



Рис. 2. Система измерения тепловой энергии локального отопительного прибора

Разность температур нагревательного элемента  $T_S(t)$  и окружающей среды  $T_0(t)$  преобразуется в термоЭДС с помощью термоэлемента. Величина термоЭДС  $U_T(t)$  определяется по соотношению

$$U_T(t) = \alpha_T \left( T_S(t) - T_0(t) \right), \tag{5}$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент Зеебека (или термоэлектрическая способность термоэлемента), мВ/К, зависящий от материала используемых проводников и интервала температур.

Реализованный генератор термоЭДС  $U_T$  преобразуется в генератор тока последовательным включением сопротивления R в цепь термобатареи и интегратора дискретного действия (ИДД) на основе суперионного проводника.

Тепловая энергия, рассеиваемая за время т в окружающую среду нагревательным элементом, определяется соотношением

$$W(\tau) = \int_{0}^{\tau} \Theta(t) dt = \int_{0}^{\tau} aS[T_{s}(t) - T_{0}(t)] dt.$$
 (6)

С другой стороны, заряд, записанный на ИДД за то же время т, определяется аналогичным соотношением

$$Q(\tau) = \int_{0}^{\tau} I_{3}(t) dt = \int_{0}^{\tau} a_{T} \left[ \left( T_{S}(t) - T_{0}(t) \right) / R \right] dt,$$
(7)

где  $I_3(t) = U_T(t)/R$  представляет ток записи интегратора.

Таким образом, интегральный заряд ИДД за время  $\tau$  будет пропорционален количеству тепловой энергии, рассеянной отдельным конвектором. Величина заряда  $Q(\tau)$  определяется считыванием информации с ИДД постоянным током  $I_c$  заданной величины по простому соотношению

$$Q(\tau) = \int_{0}^{\tau} I_{3}(t) dt = I_{c} t_{c},$$
(8)

где  $t_c$  – время считывания информации с интегратора;  $I_c$  – ток считывания информации с интегратора.

При оценке значений коэффициентов пропорциональности и значений уровня сигналов можно пользоваться температурными табл. 2 и 3, применяемыми в системах теплоснабжения города. Для теплоснабжения жилых домов и промышленных предприятий задаются таблицы температур, которые составлены на каждый градус отклонения наружной температуры и поддерживаются в подающих и обратных трубопроводах тепловых сетей. Таким образом, данные табл. 2 и 3 включают значения температуры наружного воздуха  $T_{\rm H,B}$ , температуры воды в подающем и обратном трубопроводах  $T_1$  и  $T_2$ .

Температура,	ТЭЦ 1	, 2, 3	На промышленных предприятиях		
$T_{{}_{\mathrm{H},\mathrm{B}}}$	$T_1$	$T_2$	$T_1$	$T_2$	
+5,0	72	43	58	38	
$\pm 0$	78	44,7	72	43,2	
-5	86,1	47,8	84,8	48	
-10	99,3	52,6	9,3	52,5	
-15	112,2	57,2	109,6	58,8	
-20	125	61,6	121,7	60,9	
-24	135	65	131,2	64	

Таблица 2

Для микрорайонов Горки-2, Азино и Савиново (Казань) данные таблицы в дневное и ночное время выглядят следующим образом.

				Таолица 5			
Температура	ТЭЦ 1, 2 на город						
воздуха, Т <sub>н.в</sub>	<i>Т</i> <sub>1</sub> , дн.	$T_{2}$ , ночн.	<i>T</i> <sub>1</sub> , дн.	<i>T</i> <sub>2</sub> , ночн.			
+5	81,3	70	38,3	43			
$\pm 0$	87,3	78	40,5	44,			
-5	98,0	86,1	43,8	4,8			
-10	108,6	99,3	47,0	2,6			
-15	119,1	112,2	50,3	57,2			
-20	129,4	125	53,0	61,6			
-25	139,8	-	59,4	-			
-30	159	_	64	-			

Принципиальным моментом является то, что при достижении температуры воды 70 °C в обратных трубопроводах температура воды в подающих трубопроводах не повышается.

Таким образом, в рассматриваемых системах учет расхода тепловой энергии отопительного прибора осуществляется в два этапа.

На первом этапе в течение временного интервала  $[0; \tau]$  непрерывно определяют разность температур отопительного прибора и отапливаемого помещения, информацию преобразуют в ток записи интегратора дискретного действия на основе суперионного проводника и сохраняют в виде количества электричества Q за временной интервал  $[0; \tau]$ . Отметим, что данное устройство во время работы для записи и хранения необходимой информации не требует источника питания.

На втором этапе количество электричества *Q* считывают заданным током считывания и определяют расход тепловой энергии отопительного прибора по расчетным соотношениям.

Вся система измерения тепловой энергии состоит из измерительной цепи и устройства считывания информации. Измерительная цепь состоит из ИДД на основе суперионного проводника, системы термопреобразователей и токозадающего резистора. Устройство считывания информации состоит из генератора стабильного тока, порогового устройства и регистрирующего устройства. Периодичность определения и опроса энергопотребления в зависимости от необходимости может осуществляться раз в час, день, месяц или за весь отопительный сезон. Варианты измерения потребления тепловой энергии отдельной квартирой, домом и микрорайоном представлены на рис. 3.



Рис. 3. Измерение потребления тепловой энергии отдельной квартиры (а), отдельным домом (б) и микрорайоном

Таким образом, измерительная система для дома будет состоять из датчиков разности температур отопительных приборов комнат отдельной квартиры, которые соединены последовательно, и единствен-

ного интегратора на основе суперионного проводника, на который записывается и хранится интегральное значение энергопотребления. Устройство считывания и хранения информации энергопотребления отдельной квартиры устанавливается в одном экземпляре на весь дом. Данные устройства передают информацию об энергопотреблении в соответствующие ЖЭУ. В предлагаемой измерительной системе датчик, регистратор и индикатор расположены отдельно друг от друга. Это обеспечивает гибкость монтажа и организации всей измерительной системы. Для работы регистратора энергопотребления отдельной квартиры не требуется никаких источников питания при записи и хранении информации расходования тепловой энергии.

В основе построения системы электронного измерения и определения вырабатываемой тепловой энергии, т.е. энергии термоэлектрогенераторов, таких, как топливные (тепловая энергия от сжигания топлива (природный газ, нефть, уголь) и тепло от горения пиротехнических составов (шашек)), радиоизотопные (тепловая энергия от распада изотопов (распад не контролируется и работа определяется периодом полураспада)), атомные (тепловая энергия атомного реактора, как правило, здесь термо-электрогенератор – вторая и третья ступень преобразования), солнечные (тепловая энергия от солнечных коллекторов (зеркала, линзы, тепловые трубы)), утилизационные (тепловая энергия из любых источников, выделяющих сбросное тепло (выхлопные и печные газы и др.)), лежит эффект прямого преобразования тепловой энергии в электричество посредством использования в его конструкции термо-элементов. В этом случае заряд ИДД будет пропорционален интегральному показателю энергии термо-электрогенератора.

Величина возникающей термоЭДС в первом приближении [8] зависит только от материала проводников и температур горячего ( $T_1$ ) и холодного ( $T_2$ ) контактов. В небольшом интервале температур термоЭДС *Е* можно считать пропорциональной разности температур:

$$E = \alpha_{12} \left( T_1 - T_2 \right), \tag{9}$$

где *а*<sub>12</sub> – термоэлектрическая способность пары (или коэффициент термоЭДС).

В простейшем случае коэффициент термоЭДС определяется только материалами проводников, однако, он зависит и от температуры и в некоторых случаях с изменением температуры  $\alpha_{12}$  меняет знак.

Более корректное выражение для термоЭДС:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{12}(T) dt,$$
 (10)

т.е. заряд ИДД Q будет пропорционален интегральному показателю энергии термоэлектрогенератора при разности температур ( $T_1$ – $T_2$ ).

В основе построения системы электронного измерения и определения эффекта перемещения, выявления усталости конструкций может использоваться явление прямого пьезоэлектрического эффекта. Заряд ИДД в этом случае будет пропорционален интегральному показателю периода эксплуатации и как следствие, сопротивлению усталости конструкции.

Рассмотренные системы открывают перспективы для построения достаточно простых для технической реализации, надежных и точных устройств измерения тепловой энергии локальных отопительных приборов квартир. Приведем отличительные особенности подобных устройств:

1) устройства при работе не потребляют никакой дополнительной энергии, кроме преобразованной в первичном преобразователе;

2) реализована возможность интеграции и использования одного блока считывания с измерительными цепями;

3) измерительная цепь устанавливается на поверхности объекта измерения и не требует дополнительного монтажа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Karamov F.A.* Superionic Conductors: Heterostructures and Elements of Functional Electronics Based on Them. India: Viva Books Private Limited, 2015. 235 p.

- 2. Gorbunov I.A., Karamov F.A. Functional Electronics with Discrete Integrators Based on Superionic Conductors // Russian Journal of Electrochemistry. 2007. Vol. 43. № 5. P. 603–605.
- 3. Горбунов И.А., Карамов Ф.А. Приборы учета энергоресурсов на интеграторах дискретного действия на основе суперионных проводников // Электрохимия. 2015. № 5. С. 517–519.
- 4. Теплосчетчик ТС. ТМК. Методика поверки. М.: ВНИИМС, 1997. 15 с.
- 5. Теплосчетчик КСТ-В. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. М.: ВНИИМС, 2000. 25 с.
- 6. Способ учет расхода тепловой энергии отопительного прибора и устройство для его осуществления: пат. 2145063 Рос. Федерация, № 98119907/28; заявл. 26.10.1998; опубл. 27.01.2000, Бюл. № 3.
- 7. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамические сопротивления. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
- 8. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Физматлит, 2004. Т. 3. Электричество. 656 с.

Поступила в редколлегию 8.06.18

## INTEGRATORS OF DISCRETE ACTION IN DESIGNING THE DEVICES OF MODERN RADIO SYSTEMS

#### I.A. Gorbunov, F.A. Karamov, and S.A. Startsev

The paper considers the problems of realizing the functionally complete electronic measuring devices, which use the discrete integrators (DI) based on superionic conductors of constant composition.

Keywords: superionic conductors, integrating elements, integrators of discrete action, measuring devices.

**Горбунов Игорь Александрович** – доцент (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: gia@eps.kstu-kai.ru

**Карамов Фидус Ахмадиевич** – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: karamov@eps.kstu-kai.ru

Старцев Сергей Александрович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань) E-mail: srg.st@mail.ru

#### ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. А.Н. ТУПОЛЕВА»

В журнале «Вестник Казанского государственного технического университете им. А.Н. Туполева» публикуются результаты фундаментальных и прикладных исследований ученых КНИТУ-КАИ, других вузов и научных организаций. Кроме того, в журнале публикуются статьи информационного и дискуссионного характера.

Представленная в журнал работа должна быть законченным научным исследованием и содержать новые научные результаты.

Отправляя рукопись в журнал, автор гарантирует, что соответствующий материал (в оригинале или в переводе на другие языки или с других языков) ранее нигде не публиковался и не находится на рассмотрении для публикации в других издательствах.

Статья не должна превышать по объему 8 – 9 страниц с учетом рисунков и таблиц. Обзоры направляются в редакционную коллегию по предварительному согласованию.

В статьях должна быть использована международная система единиц измерения СИ.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в тексте, таблицах, графиках; сокращения допускаются только общепринятые.

Цитируемая литература нумеруется в порядке упоминания, в тексте порядковый номер ссылки заключается в квадратные скобки.

Нумерация и включение в список литературы всех упомянутых в статье источников обязательны. Ссылки на статьи, находящиеся в печати, не допускаются.

Статья, нуждающаяся в доработке, направляется авторам с замечаниями. Доработанная статья рецензируется повторно.

Материалы, представляемые к публикации, направляются в редакционную коллегию журнала по адресу 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10, КНИТУ-КАИ, ответственному секретарю журнала.

Материалы должны содержать:

– два экземпляра статьи на бумаге формата А4, подписанные всеми авторами, и ее компьютерный вариант;

- лист с расшифровкой индексов, образованных от русских слов;

- сопроводительное письмо на имя главного редактора;

- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати;

 – выписку из протокола заседания кафедры (отдела) или НТС организации с рекомендацией к опубликованию и указанием раздела журнала;

– сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, полное название учреждения с указанием факультета и кафедры (отдела, сектора и т.п.); е-mail; телефон для связи;

- название статьи на английском языке;

- аннотацию и ключевые слова на русском и английском языках.

#### Обязательные структурные элементы статьи и их оформление

1. УДК: размер шрифта – 10 пт, светлый курсив, выравнивание по левому краю, интервал перед абзацем и после абзаца 0 пт.

2. Название статьи: размер шрифта – 14 пт, жирный прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 12 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал одинарный.

3. Инициалы и фамилии авторов: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 8 пт, после – 12 пт;

4. Аннотация на русском языке: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, перед абзацем – 0 пт, после – 4 пт, отступ слева – 2 см, отступ справа – 2 см, межстрочный интервал – множитель 1,1.

5. Ключевые слова на русском языке: размер шрифта – 10 пт, жирный прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 6 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

6. Текст статьи основной: размер шрифта – 11 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1, первая строка – отступ 0,6 см; подзаголовок: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 6 пт, после – 3 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

7. Список литературы заголовок: размер шрифта – 11 пт, светлый прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 9 пт, после – 6 пт; текст списка: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 0 пт, отступ слева – 1 см, отступ справа – 1 см, первая строка – выступ 0,35 см, межстрочный интервал одинарный, фамилии авторов выполняются курсивом.

8. Дата отправки статьи в редакцию: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по правому краю, интервал перед абзацем – 6 пт, после – 0 пт.

9. Название статьи на английском языке: размер шрифта – 14 пт, жирный прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 12 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал одинарный.

10. Инициалы и фамилии авторов по-английски: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 8 пт, после – 12 пт.

11. Аннотация на английском языке: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 4 пт, отступ слева – 2 см, отступ справа – 2 см, межстрочный интервал – множитель 1,1.

12. Ключевые слова на английском языке: размер шрифта – 10 пт, жирный прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 6 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

13. Сведения об авторах (Ф.И.О., звание, должность, структурное подразделение, организация, e-mail): размер шрифта – 11 пт, светлый прямой, выравнивание по левому краю, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 5 пт.

#### Требования к оформлению статей

Компьютерный вариант статьи оформляется в виде единого файла, включающего полный текст статьи, формулы, таблицы, рисунки, список литературы и сведения об авторах. Файл именуется по фамилии первого автора.

Файл должен быть представлен в редакторе Microsoft Word 2003.

Параметры страницы:

– размер бумаги – А4;

- поля - зеркальные;

– верхнее поле – 1,8 см;

нижнее поле – 2,9 см;

– внутреннее поле – 1,4;

– наружное поле – по 2,0 см;

– расстояние до верхнего колонтитула – 0 см;

– расстояние до нижнего колонтитула – 2,2 см.

Шрифт текста статьи – Times New Roman.

Таблицы и иллюстрации. На все помещаемые в статью таблицы и иллюстрации (чертежи, графики, схемы, компьютерные распечатки, диаграммы, фотоснимки, рисунки) в тексте должны присутствовать ссылки. Каждая иллюстрация и таблица должна иметь содержательное наименование и номер. Следует использовать сквозную нумерацию (арабскими цифрами) в пределах статьи отдельно для иллюстраций и таблицы и иллюстрации располагаются непосредственно после абзаца, в котором содержится ссылка на них.

Таблицы представляются по следующей форме.

Слово «Таблица»: размер шрифта – 9 пт, светлый, курсив, выравнивается по правому краю таблицы.

Название таблицы: размер шрифта – 9 пт, полужирный, располагать по центру. Содержимое ячеек следует располагать по центру.

Содержательная часть таблицы: размер шрифта – 9 пт, светлый, прямой.

Толщина линий в таблицах – 0,5 пт.

Пропуски в столбцах при отсутствии данных заполняют тире.

Размерности числовых данных в таблицах выносят в текст головки или название таблицы.

Иллюстрации должны быть тщательно подготовлены для печати в электронном виде (сканированы или выполнены в графическом редакторе) и вставлены в текст. Сканирование должно быть выполнено с разрешением не менее 300 dpi с расширением .tif или .jpg. Допускается представление иллюстраций в формате .cdr. Иллюстрации, выполненные при помощи средств рисования MS Office, не принимаются.

Графики должны иметь полную систему указателей в подрисуночных подписях или в тексте статьи. Внутририсуночные обозначения: размер символов – 9 пт, латинские символы – шрифт Times New Roman светлый курсив, символы кириллицы – шрифт Times New Roman светлый прямой, греческие символы – шрифт Symbol светлый прямой.

Оси координат и кривые должны быть изображены линиями одинаковой толщины 0,25 мм. Координатная сетка – линиями толщиной 0,18 мм. Подрисуночная подпись: размер шрифта – 9 пт, пояснение к подрисуночным подписям: размер шрифта – 8 пт.

Формулы набирать в редакторе формул MathType.

Латинские символы: шрифт Times New Roman светлый курсив.

Символы кириллицы – шрифт Times New Roman светлый прямой.

Греческие символы – шрифт Symbol светлый прямой.

Размер символов в формулах:

- обычный - 11 пт;

- индекс - 65 % от обычного;

- символ – 150 % от обычного.

Формулы, на которые имеются ссылки в тексте, нумеруются и располагаются по центру строки, номер формулы должен совпадать с правым краем границы текста. После каждой формулы в соответствии с контекстом должен стоять знак пунктуации (запятая, точка и т.п.).

# Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.

За справками обращаться к ответственному секретарю журнала. Тел.: 238-58-10

E-mail: at-secretary@yandex.ru

# ВЕСТНИК КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА им. А.Н. ТУПОЛЕВА

2019, № 1 (95)

Ответственный за выпуск *Е.М. Зиннатуллина* Компьютерная верстка – *А.А. Золина* 

Выход в свет 25.03.19. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 15,3. Тираж 200. Заказ ГЗЗ. Цена 200 руб.

Адрес издателя, редакции, типографии: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, редакция журнала «Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева». Тел. (843) 238-58-10; факс (843) 236-60-32; www.kai.ru/vestnik/ E-mail: vestnik.kstu-kai@yandex.ru Address: KNRTU-KAI, 10 Karl Marx Str., Kazan, 420111, Russia

Подписной индекс – 18040

Издательство КНИТУ-КАИ