

28. Balzarotti A. Lattice distortions around atomic substitutions in II–VI alloys // *Physica*. 1987. Vol. 146B. P. 150–175.

29. Crystallographic structure of ternary semiconducting alloys / M. Podgorny, M. T. Czyzyk, A. Balzarotti et al. // *Sol. St. Comm.* 1985. Vol. 55. P. 413–417.

30. EXAFS of  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  – a test of the random distribution in zincblende ternary alloys / N. Motta, A. Balzarotti, P. Letardi et al. // *Sol. St. Comm.* 1985. Vol. 53. P. 509–512.

31. Schabel M. C., Martin J. L. Structural model for pseudobinary semiconductor alloys // *Phys. Rev.* 1991. Vol. 43B. P. 11873–11883.

32. Phillips J. C. Bonds and bands in semiconductors. New York: Academic, 1973. 8 p.

33. Mikkelsen J. C., Boyce J. B. Extended x-ray absorption fine structure study of  $Ga_{1-x}In_xAs$  random solid solution // *Phys. Rev.* 1983. Vol. B28. P. 7130–7140.

I. A. Cheremukhina

*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

## MICROSCOPIC THERMODYNAMIC MODELS OF QUASIBINARY SEMICONDUCTOR SOLID SOLUTIONS

*A review of microscopic models describing the thermodynamics of semiconductor quasibinary solid solutions of type  $A^3B^5$  and  $A^2B^6$  is presented. The main existing approaches are analyzed. The structural model with a tetrahedron as the main cluster takes into account the relaxation of only the central atom and differs from the earlier models in the way of estimating the excess free energy. This makes it possible to evaluate the irregularity of solid solutions in a more objective way. Such structural model gives overestimated results in constructing phase diagrams, because it neglects higher order relaxation. The model with larger main clusters takes into account relaxation to the second coordination sphere and in some cases gives good agreement with the experimental results. But this model leads to rather complex and cumbersome calculations of the total energy of the system. The third model is a model of an infinite disordered solid solution in the form of a supercell with periodic boundary conditions. For this model, results are presented for averaged distances to the first and second nearest neighbors and the width of the distribution of bonds for the first nearest neighbors for materials of the III–V and II–VI groups. A comparison of the calculated phase diagrams with experimentally determined regions of immiscibility is given.*

**Solid solution, cluster, coordination sphere, short-range-order, mixing enthalpy, entropy, phase diagram**

УДК 553.981

М. М. Кутя

*Университет им. Отто фон Герике, Магдебург, Германия*

Н. В. Мухин, Т. В. Гординская

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Использование флюида в сверхкритическом состоянии при сайклинг-процессе

*Проведен расчет работы модельного газоконденсатного месторождения с дифференцированным рабочим циклом, учитывая режим поддержания пластового давления. Предложен вариант разработки с нагнетанием углекислого газа в пласт. Проведено сравнение нагнетания углекислого газа в продуктивный пласт при нормальной температуре и при его подогреве до 350 К. В результате проведенных расчетов получены зависимости пластового и рабочего давления и дебита от времени работы месторождения в дифференцированном рабочем цикле. Было установлено, что при закачке углекислого газа в пласт существует значительная разница при его нагнетании в «холодном» и «горячем» состояниях. Полученные данные указывают, что при нагнетании углекислого газа, подогретого до 350 К, необходимо держать более низкое давление на устье скважины, что может привести к значительному экономическому эффекту за весь период эксплуатации месторождения в режиме поддержания пластового давления.*

**Сверхкритическое состояние вещества, газоконденсатное месторождение, углекислый газ**

Большое количество методов интенсификации работы газового месторождения на данный

момент применяется для увеличения отбора газа, газового конденсата и нефти на месторождениях

углеводородов. Все эти методики основаны на решении проблем, возникающих или приобретающих критический характер в процессе эксплуатации и связанных, в первую очередь, с падением пластового давления. Для их решения внедряют вторичные и третичные методы воздействия на пласт и призабойную зону скважины. Основная проблема для газовых и газоконденсатных месторождений – снижение добычи конденсата вследствие его перехода из сверхкритического состояния в жидкую фазу. На начальном этапе эксплуатации газоконденсатного месторождения газовый конденсат находится в сверхкритическом состоянии, когда различия между жидкой и газообразной фазой отсутствуют. При падении давления ниже точки обратной конденсации газовый конденсат переходит в жидкое состояние, что ведет к резкому снижению конденсатоотдачи месторождения [1]–[3]. Для снижения потерь применяют технологии поддержания пластового давления, из которых наиболее распространен на данный момент так называемый сайклинг-процесс. Его особенность – нагнетание в пласт газа, добытого на этом же месторождении и прошедшего очистку от конденсата. Минусом данной технологии является то, что сухой газ на долгое время консервируется внутри месторождения, циркулируя между продуктивным пластом и установкой подготовки газа на поверхности. Другие варианты сайклинг-процесса – неполные, так как в пласт закачивается только часть добытого газа, и предусматривают постепенное снижение пластового давления, что, в свою очередь, снижает конденсатоотдачу. Альтернативой сайклинг-процессу служит нагнетание в пласт газов, инертных к углеводородам – в первую очередь азота и углекислого газа [4].

**Описание расчетной модели.** Математическая модель разработки газового месторождения разработана на системе уравнений объединяет расчет плоскорадиального притока газа к скважинам и вертикального транспорта газа по колонне насосно-компрессорных труб [5]. Неразрывность расчета обеспечена уравнением материального баланса. Функционально математическая модель разделена на три основных блока: исходные данные, блок регулирования расчета и расчетное ядро (рис. 1). Блок построения трехмерной матрицы исходных данных для каждого шага расчета с учетом коррекционных проектных изменений. Второй блок обрабатывает матрицу исходных данных и связывает ее с расчетным ядром программы, корректирует исходные данные в соответствии с результатами расчета, дает вывод ин-

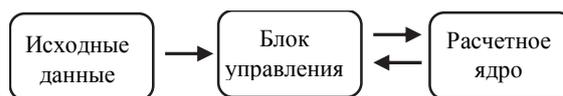


Рис. 1

формации. Третий блок является непосредственно расчетным ядром, использующим следующие уравнения: уравнение материального баланса продуктивного горизонта, уравнение притока газа к скважине, уравнение вертикального транспорта. Расчетное ядро математической модели можно разделить на несколько частей. Блок предварительных расчетов:

$$p_{cr} = 4.892 - 0.404\rho;$$

$$T_{cr} = 94.717 + 170.8\rho;$$

$$p_{rds} = \frac{p_{ls}}{p_{cr}};$$

$$T_{rds} = \frac{T_1}{T_{cr}};$$

$$z_{ls} = [0.41 \lg(T_{rd}) + 0.73]^{p_{rds}} + 0.1 + p_{rds};$$

$$U = \frac{Q_{gs} z_{ls}}{p_{ls}};$$

$$T_{ev} = \frac{T_1 - T_h}{\ln\left(\frac{T_1}{T_h}\right)},$$

где  $p_{cr}$  и  $T_{cr}$  – критические температура и давление;  $\rho$  – плотность газа в нормальных условиях,  $p_{rds}$  и  $T_{rds}$  – начальные приведенные давление и температура;  $p_{ls}$  – пластовое давление до вскрытия продуктивного горизонта;  $T_1$  и  $T_h$  – пластовая температура и среднегодовая температура на поверхности;  $z_{ls}$  – исходный коэффициент сверхсжимаемости,  $U$  – коэффициент пропорциональности; определяющий параметры резервуара до начала разработки;  $T_{ev}$  – средняя температура в колонне скважины;  $Q_{gs}$  – запасы газа до вскрытия резервуара.

Блок расчета текущего пластового давления:

$$z_1 = [0.41 \lg(T_{rd}) + 0.73]^{p_{rd}} + 0.1 + p_{rd};$$

$$p_1 = \left( \frac{p_{ls}}{z_{ls}} - \frac{Q_e}{U} \right) z_1;$$

$$p_{rd} = \frac{p_1}{p_{cr}},$$

где  $z_1$  – текущее значение пластового давления;  $p_{rd}$  и  $T_{rd}$  – текущие значения приведенного давления и

температуры;  $Q_e$  – газ, добытый за все время разработки;  $z_1$  – текущее значение коэффициента сверхсжимаемости;  $p_1$  – текущее пластовое давление.

Блок определения статического давления на устье скважины:

$$s = \frac{0.0345 \rho L}{T_{ev} z_{ev}};$$

$$p_{st} = \frac{p_1}{e^s};$$

$$p_{ev} = \frac{p_{st} + p_1}{2};$$

$$p_{rdev} = \frac{p_{ev}}{p_{cr}};$$

$$p_{rdev} = \frac{p_{ev}}{p_{cr}};$$

$$z_{ev} = [0.4 \lg(T_{rdev}) + 0.73]^{p_{rdev}} + 0.1 + p_{rdev};$$

$$\Theta = 0.0133 \lambda \frac{z_{ev}^2 T_{ev}^2}{D_{pt}^5} (e^{2s} - 1),$$

где  $s$  и  $\Theta$  – коэффициенты пропорциональности;  $p_{st}$  – статическое давление на устье скважины;  $p_{ev}$  – среднее давление в колонне НКТ;  $p_{rdev}$  и  $T_{rdev}$  – среднее приведенное давление и температура в колонне НКТ;  $z_{ev}$  – среднее значение коэффициента сверхсжимаемости;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления НКТ;  $D_{pt}$  – диаметр НКТ;  $e$  – основание натурального логарифма.

В зависимости от параметров работы месторождения и граничных условий эксплуатации залежи, расчет в блоке определения параметров притока может вестись тремя различными методами. Для режима постоянного дебита необходимо использовать уравнения

$$q = q_{max}$$

$$p_{dh} = \sqrt{p_1^2 - Aq - Bq^2};$$

$$\Delta p = p_1 - p_{dh}$$

$$p_{wh} = \sqrt{\frac{p_{dh}^2 - q^2 \Theta}{e^{2s}}}.$$

В случае режима постоянной депрессии на пласт расчет в блоке ведется по следующим уравнениям:

$$\Delta p = \Delta p_{max};$$

$$p_{dh} = p_1 - \Delta p;$$

$$q = \frac{-A}{2B} + \sqrt{\left(\frac{A}{2B}\right)^2 + \frac{p_1^2 - p_{dh}^2}{B}};$$

$$p_{wh} = \sqrt{\frac{p_{dh}^2 - q^2 \Theta}{e^{2s}}}.$$

В случае перехода в режим постоянного рабочего давления на устье скважины необходимо применять следующие уравнения:

$$p_{wh} = p_{wh_{min}};$$

$$q = \frac{-A}{2(B + \Theta)} + \sqrt{\left[\frac{A}{2(B + \Theta)}\right]^2 + \frac{p_1^2 - p_{wh}^2 e^{2s}}{B + \Theta}};$$

$$p_{dh} = \sqrt{p_1^2 - Aq - Bq^2};$$

$$\Delta p = p_1 - p_{dh},$$

где  $q$  – дебит газа для текущего момента времени;  $p_{dh}$  – давление на забое скважины;  $\Delta p$  – депрессия на пласт;  $A$  и  $B$  – коэффициенты фильтрационного сопротивления;  $h$  – мощность продуктивного горизонта;  $p_{wh}$  – давление на устье скважины.

Также очень важно, что данная модель может автоматически корректировать коэффициенты фильтрационного сопротивления  $A$  и  $B$  исходя из параметров вязкости и давления:

$$A = \frac{\mu p_{at}}{\pi k h} \ln\left(\frac{R_b}{r_w}\right);$$

$$\mu(p, T, M, Z) = \frac{(9.41 + 0.2M)(1.8T)^{1.5}}{(209 + 19M + 18T)10^7} J;$$

$$J = \exp\left\{\left(3.5 + \frac{547.8}{1.8T} + 0.01M\right) \times \left[\frac{Mp \cdot 10^3}{z_1 8314.3T_1}\right] \left[2.4 - 0.2\left(3.5 + \frac{547.8}{1.8T} + 0.01M\right)\right]\right\},$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость газа;  $k$  – коэффициент проницаемости;  $R_b$  – радиус контура питания;  $r_w$  – эффективный радиус скважины;  $p_{at}$  – атмосферное давление;  $T$  – температура;  $M$  – средняя молярная масса флюида;  $p$  – давление;  $Z$  – коэффициент сверхсжимаемости;  $J$  – коэффициент пропорциональности [6].

Расчетное ядро математической модели может автоматически выбирать оптимальный режим работы, исходя из рассчитанных параметров, осуществляя выбор между режимом постоянного дебита, постоянной депрессии на пласт и постоянного рабочего давления на устье скважины.

**Результаты расчета.** Следующие исходные данные были приняты для расчета: дренируемые запасы газа – 1 млрд м<sup>3</sup>, газ; добытый до начала расчета 0 млрд м<sup>3</sup>; средняя глубина скважин до середины перфорации – 3000 м; диаметр насосно-компрессорных труб – 62 мм; шероховатость насосно-компрессорных труб – 0.6 мм; начальное пластовое давление – 50 МПа; пластовая температура – 350 К; максимально допустимая депрессия на пласт – 3 МПа; максимально допустимый дебит – 50 тыс. м<sup>3</sup>/сут, исходный коэффициент фильтрационного сопротивления  $A$  – 2; коэффициент фильтрационного сопротивления  $B$  – 0.005; общее количество скважин – 9 шт., из них 4 шт. нагнетательной группы; точка начала обратной конденсации – на 35 МПа; объемный коэффициент нагнетания – 0.3; дебит нагнетания – 50 тыс. м<sup>3</sup>/сут, общее время расчета – 300 мес.

Проектные параметры разработки выбраны таким образом, что на начало деятельности месторождения все 9 скважин функционируют в эксплуатационном режиме. После падения пластового давления до точки обратной конденсации часть скважин переходит в нагнетательную группу. Сетка расположения эксплуатационных и нагнетательных скважин указана на рис. 2. Второй этап разработки моделируется в режиме поддержания пластового давления. Конец второго этапа должен характеризоваться прорывом «сухого» углекислого газа, который должен происходить при достижении суммарного нагнетания 50 % дренированного газа, оставшегося в месторождении на момент начала действия режима поддержания давления. Третий этап разработки месторождения – окончание режима поддержания пластового давления и возвращение всех скважин нагнетательного фонда в эксплуатационный фонд.

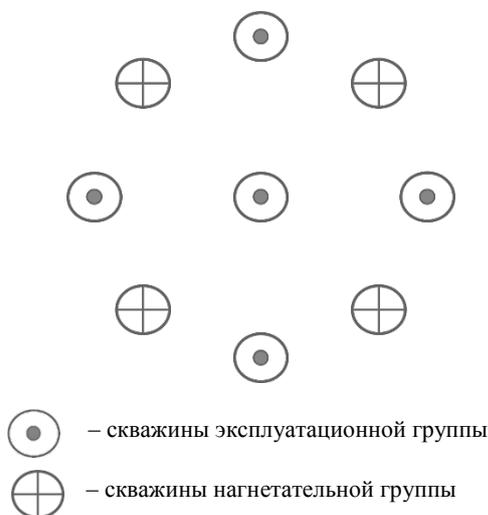


Рис. 2

На рис. 3 приведен график изменения пластового давления со временем с момента начала разработки. Как видно на рисунке, пластовое давление на месторождении должно меняться в течение всего проектного времени разработки от 50 до 1.6 МПа. В первый период эксплуатация ведется на истощение в режиме постоянного дебита. С тринадцатого по двадцать шестой месяц разработка ведется в режиме поддержания давления. За это время давление в продуктивном пласте снижается с 35 до 28 МПа. В этот период четыре эксплуатационные скважины переводятся в нагнетательную группу. По окончании второго этапа разработки скважины снова эксплуатируются на истощение.

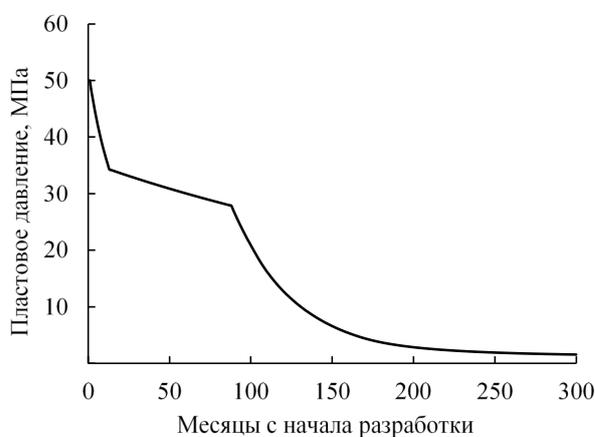


Рис. 3

На рис. 4 показана динамика отбора газа на месторождении. Стоит отметить важную особенность работы месторождения в режиме поддержания пластового давления; все скважины работают при одинаковой нагрузке в режиме постоянного дебита, не переходя в режимы постоянной депрессии на пласт и постоянного рабочего давления, что делает добычу в максимальной степени предсказуемой.

Вследствие высокого пластового давления и температуры нагнетание углекислого газа в пласт ведется в сверхкритическом состоянии. Особенность углекислого газа в сверхкритическом состоянии состоит в том, что при повышении температуры наблюдается значительное падение вязкости, что может сильно повлиять на параметры фильтрации. Как сказано ранее, предложенная математическая модель автоматически корректирует фильтрационные коэффициенты  $A$  и  $B$  исходя из параметров вязкости. Далее показаны два варианта расчета параметров работы месторождения. Первый ведется с учетом нагнетания углекислого газа в пласт при температуре окружающей

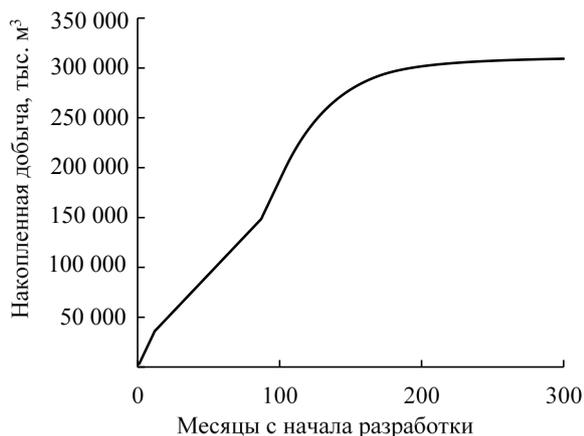


Рис. 4

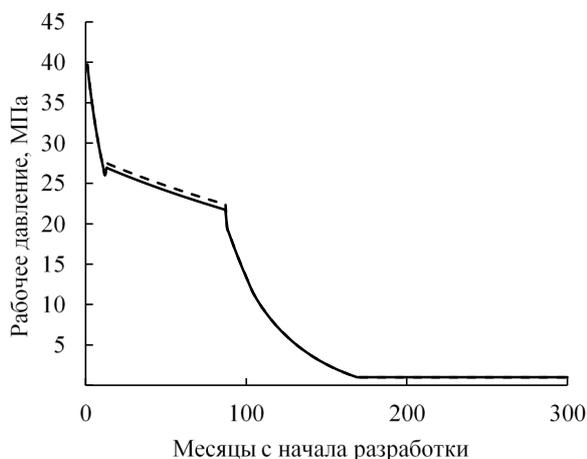


Рис. 5

среды с учетом его прогрева в процессе движения по колонне насосно-компрессорных труб. Второй расчет проведен с учетом предварительного подогрева углекислого газа до 350 К. В этом случае вязкость углекислого газа на забое скважины снизится с 0.15 до 0.11 сП [7], что приведет к значительному снижению коэффициента фильтрационного сопротивления.

На рис. 5 приведены графики зависимости рабочего давления на устье скважины от времени с момента начала разработки. Сравнивая графики

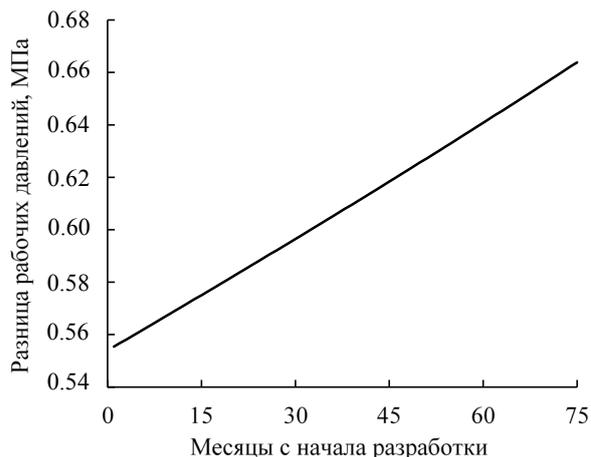


Рис. 6

рабочего давления на устье скважины нагнетательной группы при нагнетании в пласт «холодного» и «горячего» углекислого газа (сплошная и пунктирная кривые), можно прийти к выводу, что при одинаковом объемном расходе, необходимое давление нагнетания значительно различается.

Как показано на рис. 6, динамика изменения разницы рабочих давлений на устье скважины показывает постоянный прирост этого показателя. Эти данные указывают на возможность снижения рабочего давления при нагнетании углекислого газа в пласт.

В результате проведенных расчетов получены зависимости пластового и рабочего давлений и дебита от времени работы месторождения в дифференцированном рабочем цикле. Было установлено, что при закачке углекислого газа в пласт существует значительная разница при его нагнетании в «холодном» и «горячем» состояниях. Полученные данные указывают, что при нагнетании углекислого газа, подогретого до 350 К, необходимо держать более низкое давление на устье скважины, что может привести к значительному экономическому эффекту за весь период эксплуатации месторождения в режиме поддержания пластового давления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dake L. P. The practice of reservoir engineering (Revised ed.). Netherlands: Elsevier Science, 2001.
2. Закиров С. Н., Лапук Б. Б. Проектирование и разработка газовых месторождений. М.: Недра, 1974.
3. Совершенствование технологии комплексного воздействия на продуктивные пласты нефтяных и газовых скважин / О. В. Кравченко, Д. А. Велигоцкий, А. Н. Авраменко, Р. А. Хабибуллин // Вост.-Евр. журн. передовых технологий. 2014. № 6/5 (72). С. 4–9.

4. Early evaluation of uncertainties in the incremental condensate recovery through a gas cycling process / G. J. Massonnat, C. Bachtanik, E. Tutenuit, P. Gouel, N. Carles // SPE J. 1997. Vol. 2. P. 33–47.
5. Кутя М. М., Скрыльник К. Ю., Шевченко В. В. Общая модель расчета показателей разработки газоконденсатного месторождения // Вестн. нац. техн. ун-та ХПИ. 2014. № 39 (1082). С. 91–97.

6. Improvement of technological-mathematical model for the medium-term prediction of the work of a gas condensate field / M. Kutia, M. Fyk, O. Kravchenko, S. Palis, I. Fyk // East.-Eur. J. of Enterprise Technologies. 2016. № 5/8 (83). P. 40–48.

7. Viscosity of pure carbon dioxide at supercritical region: Measurement and correlation approach / E. Heidaryan, T. Hatami, M. Rahimi, J. Moghadasi // The J. of Supercritical Fluids. 2011. Vol. 56, № 2. P. 144–151.

---

M. M. Kutia

Otto von Guericke University of Magdeburg

N. V. Mukhin, T. V. Gordinskaya

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## USING A FLUID IN A SUPERCRITICAL STATE FOR THE CYCLING PROCESS

*The calculation of the operation of a model gas condensate field with a differentiated operating cycle was carried out, taking into account the mode of maintaining reservoir pressure. A development option with injection of carbon dioxide into the reservoir is proposed. A comparison of the injection of carbon dioxide into the reservoir at normal temperature with its heating to 350 degrees K is carried out. As a result of the calculations, the dependences of reservoir and working pressure and flow rate on the time of field operation in a differentiated operating cycle are obtained. It was found that when carbon dioxide is injected into the reservoir, there is a significant difference when it is injected in the «cold» and «hot» states. The data obtained indicate that, during the injection of carbon dioxide heated to 350 degrees K, it is necessary to keep a lower pressure at the wellhead, which can lead to a significant economic effect over the entire period of field operation in the mode of maintaining reservoir pressure.*

**Supercritical state of matter, gas condensate field, carbon dioxide**

---

УДК 534.232

Б. Г. Степанов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Об армировании широкополосных стержневых преобразователей с амплитудно-фазовым возбуждением секций

*Рассматривается способ армирования широкополосных стержневых преобразователей (в том числе с амплитудно-фазовым возбуждением), который позволяет устранить негативное влияние армирующей стяжки на их частотные характеристики. Стержневой преобразователь армируется единой стяжкой, отдельные участки которой прикрепляются к пьезостержню с помощью связующих вставок (кольцевых перемычек). Приводятся результаты расчетов амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик для модели преобразователя, пьезостержень которого состоит из двух частей, возбуждаемых разными по амплитуде и фазе электрическими напряжениями, с использованием дополнительных связующих вставок и без них. Дается сравнительная оценка гибкости кольцевой перемычки, а также ее габаритов для разных материалов, из которых она выполнена, и размеров пьезостержня преобразователя. Приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающие основные положения выполненных расчетов и оценок.*

**Широкополосный преобразователь, армирование стержневых преобразователей, амплитудно-фазовое возбуждение**

Требование к увеличению мощности излучения стержневых пьезоэлектрических преобразователей вызывает необходимость их армирова-

ния. Наличие единой, закрепленной в области торцов пьезостержня, армирующей стяжки соответствует механически параллельному соедине-

---