

---

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА**

**Часть III. Подготовка данных для моделирования**

**Автор,**

**К.ф.-м.н, н.с. ОАО «ТомскНИПИНефть»:**

**С.В. Пыльник**

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

---

- ◆ Equation of State of a Complex Fluid Column and Prediction of Contacts in Orocual Field, Venezuela/ Richard W.S., Wade A.B., Lugo C.// SPE 63088, Dallas, Texas, 1-4 October 2000.
- ◆ Дейнеженко А.Л., Пыльник С.В., Шевелев П.В. Восстановление начальных физико-химических свойств пластовой нефти для моделирования месторождений с газовой шапкой// Вестник ЦКР Роснедра. – 2011 – № 2. С. 38 – 43.
- ◆ Брусиловский А.И., Нугаева А.Н., Хватова Е.И. Методология системного обоснования свойств пластовых нефтей при подсчете запасов и проектировании разработки месторождений (часть I) // Недропользование – XXI век. 2009. № 5. С. 23–30.

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

---

### Порядок работы с данными:

- ◆ корреляционный анализ между экспериментально определенными характеристиками флюида;
- ◆ корреляционный анализ между характеристиками нефти и компонентным составом;
- ◆ проведение дробления на основе ИТК-эксперимента.

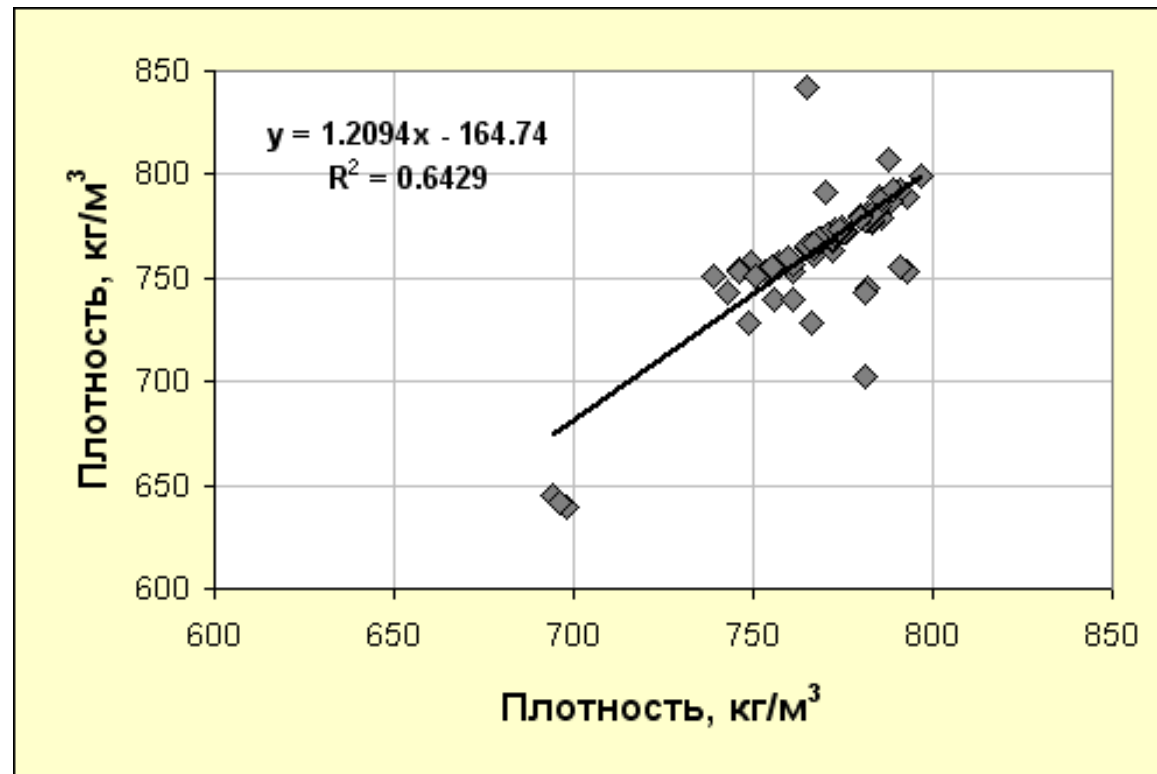
## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Корреляционный анализ

---

**В основном анализ базируется на сопоставлении всех возможных характеристик, таких как:**

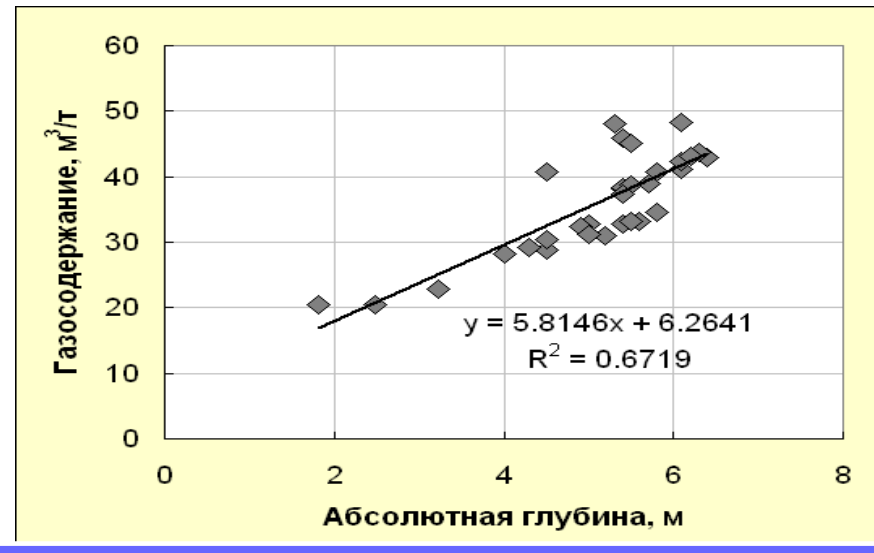
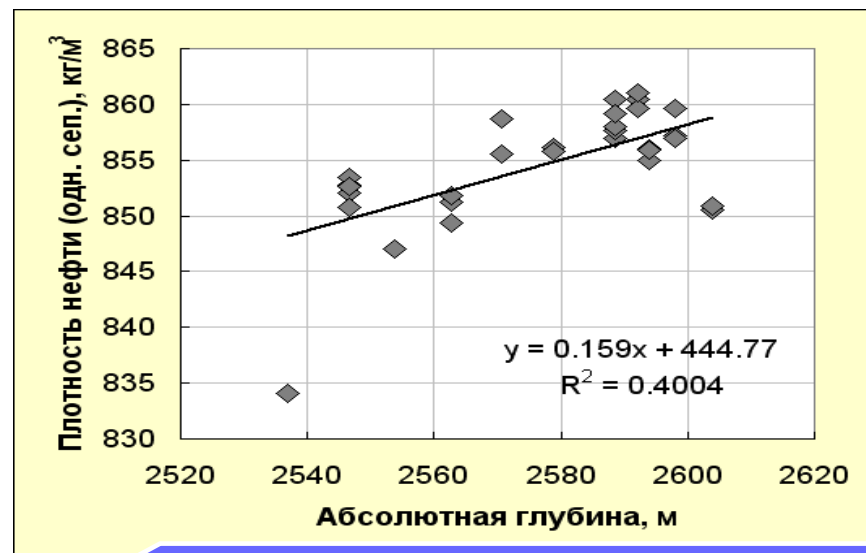
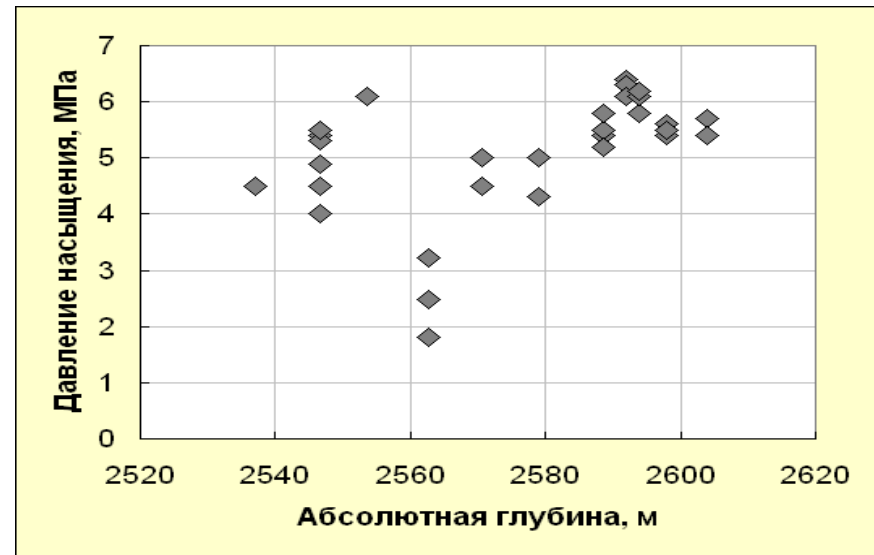
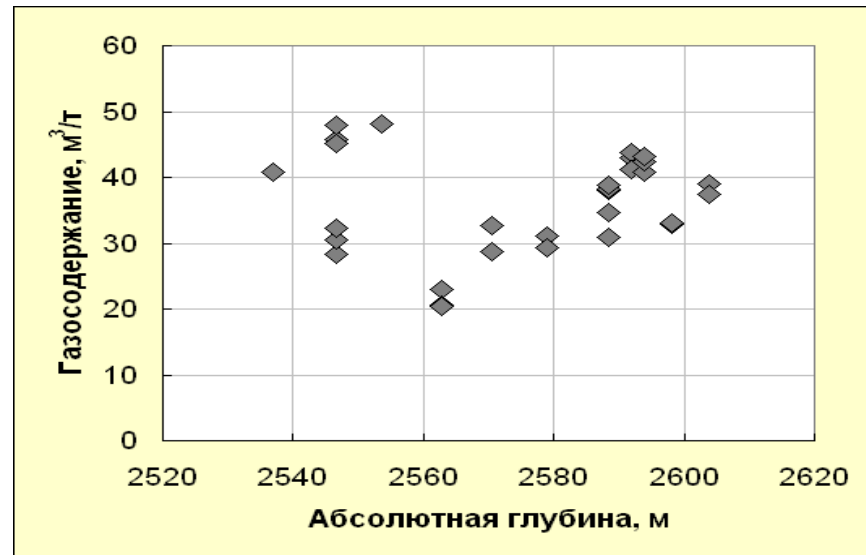
- ◆ сохранение массы;
- ◆ газосодержание – абсолютная глубина;
- ◆ давление насыщения – абсолютная глубина;
- ◆ поверхностная плотность нефти – абсолютная глубина;
- ◆ давление насыщения – газосодержание;
- ◆ газосодержание – объемный коэффициент;
- ◆ давление насыщения – мольная концентрация метана в пластовой нефти;
- ◆ давление насыщения – мольная концентрация  $C_{6+}$  в пластовой нефти;
- ◆ газосодержание – мольная концентрация метана в пластовой смеси;
- ◆ плотность – вязкость.

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Корреляционный анализ

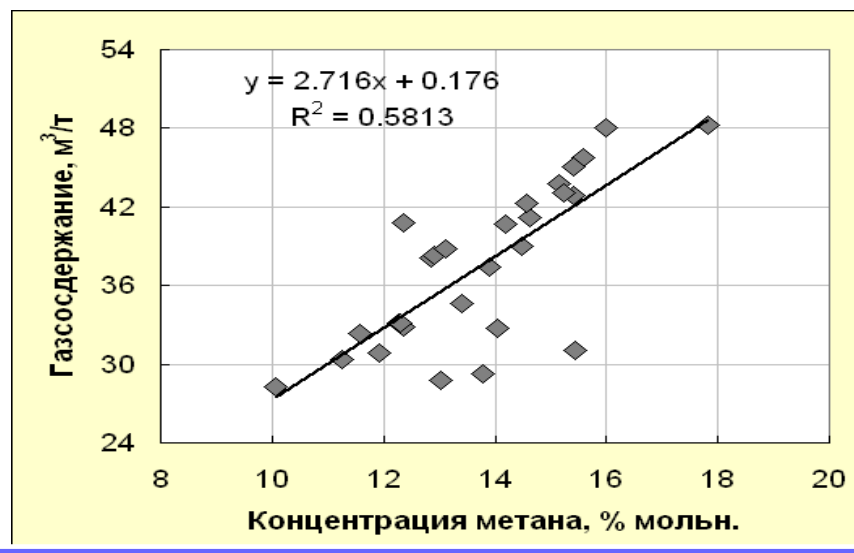
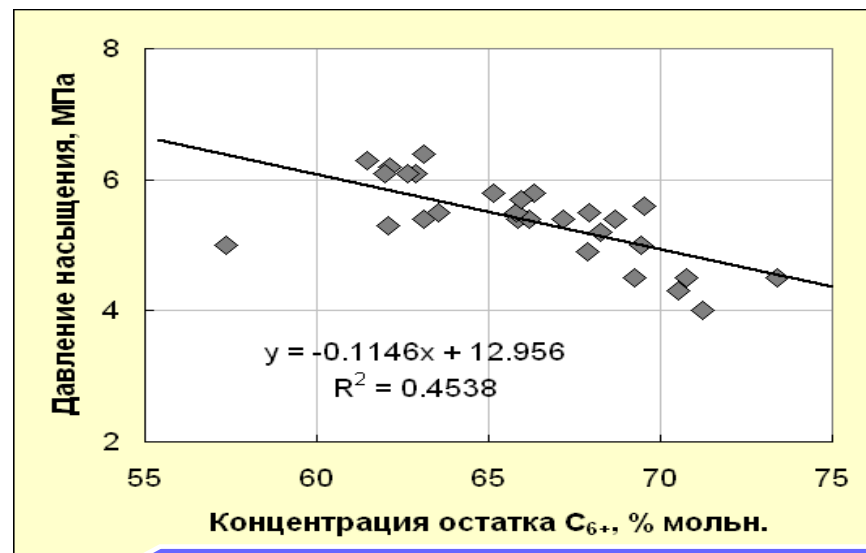
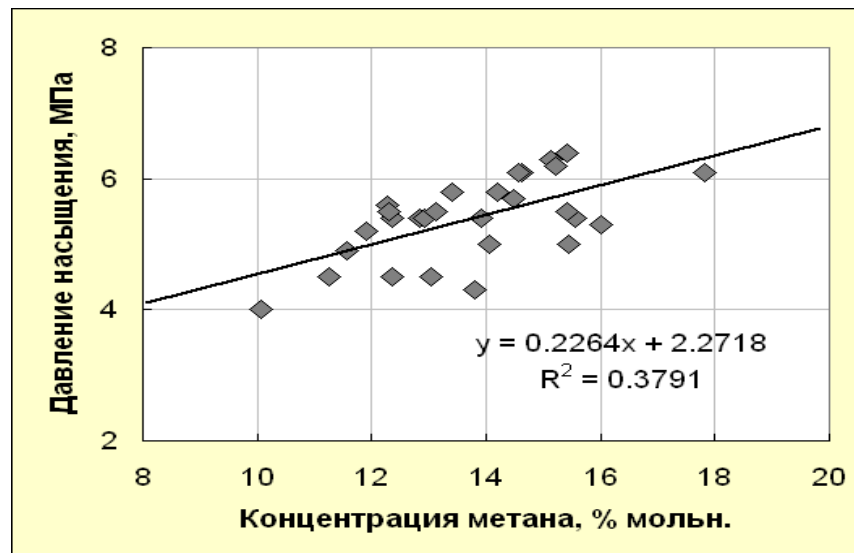
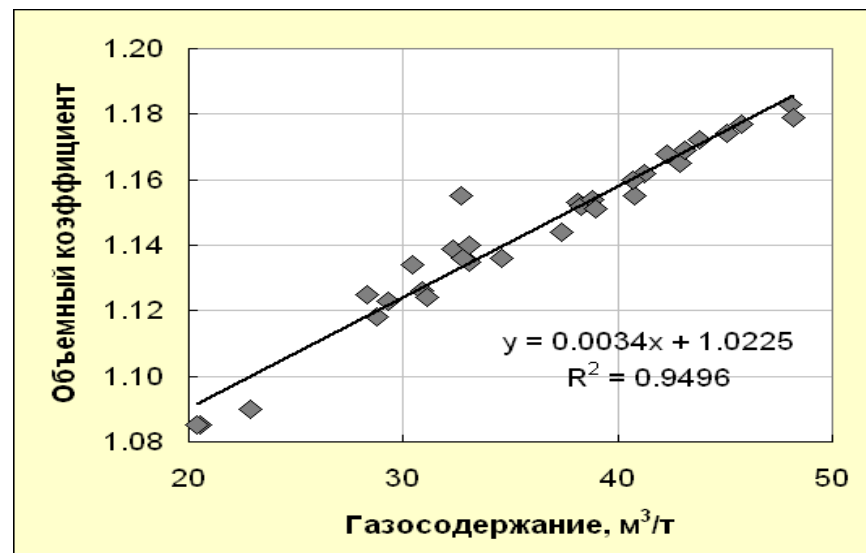


$$\rho_{oil,r} = \frac{1}{B_{oil}} \left[ \rho_{oil,st} + \Gamma \cdot \rho_{gas,st} \right]$$

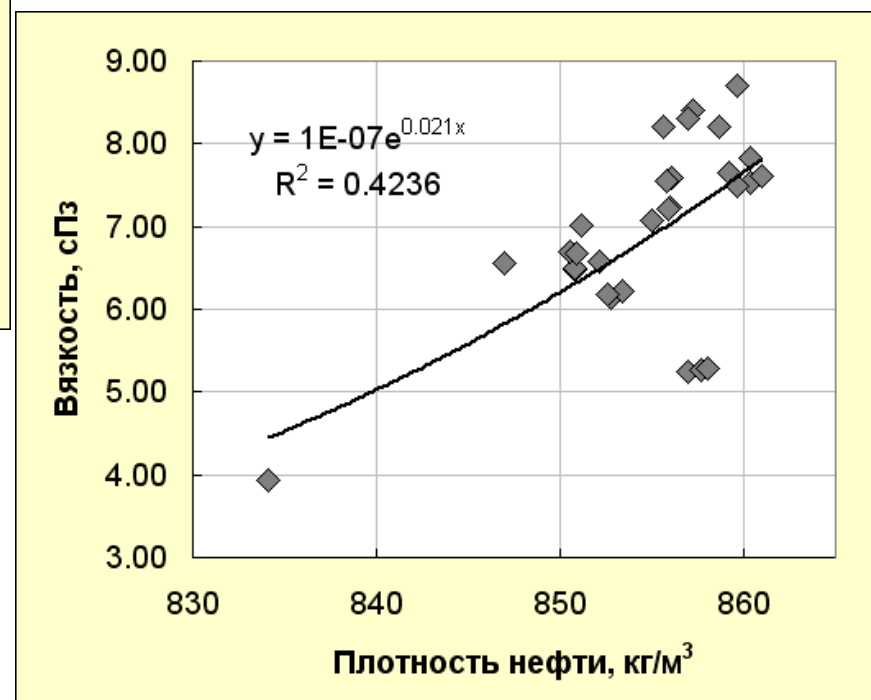
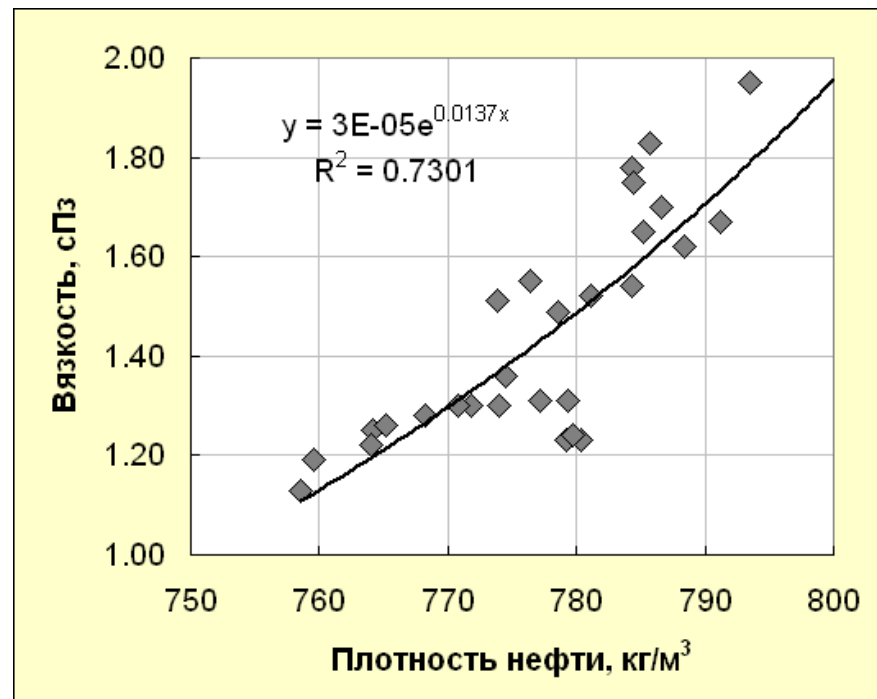
## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Корреляционный анализ



## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Корреляционный анализ



## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Корреляционный анализ





## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка

$$M = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^N x_i M_i \Rightarrow M_{C6+} = \left( \frac{100 \cdot M - \sum_{i=1}^{N-1} x_i M_i}{x_{C6+}} \right) \quad (1)$$

**Таблица 1 – Компонентный состав пластового флюида**

| Мнемоника        | Название компонента    | Молярная концентрация, % |
|------------------|------------------------|--------------------------|
| CO2              | Диоксид углерода       | 0,39                     |
| N2               | Азот+редкие газы       | 0,87                     |
| C1               | Метан                  | 15,60                    |
| C2               | Этан                   | 2,20                     |
| C3               | Пропан                 | 5,53                     |
| IC4              | Изо-бутан              | 2,06                     |
| NC4              | Н-бутан                | 4,96                     |
| IC5              | Изо-пентан             | 2,27                     |
| NC5              | Н-пентан               | 3,06                     |
| C6+              | Гексаны+высшие         | 63,10                    |
| M                | Молярная масса         | 154                      |
| M <sub>C6+</sub> | Молярная масса остатка | 222                      |

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка

**Таблица 2 – Фракционный состав разгазированного флюида**

| Фракционный состав, % объем.         |        |        |        |        |           |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| температура<br>начала<br>кипения, °С | до 100 | до 150 | до 200 | до 250 | до<br>300 |
| 45                                   | 7      | 20     | 30     | 42     | 55        |

$$\rho_{C6+} = \frac{g_{C6+}}{\frac{1}{\rho_{deg.n.}} - \frac{g_1}{\rho_1}} \quad (2)$$

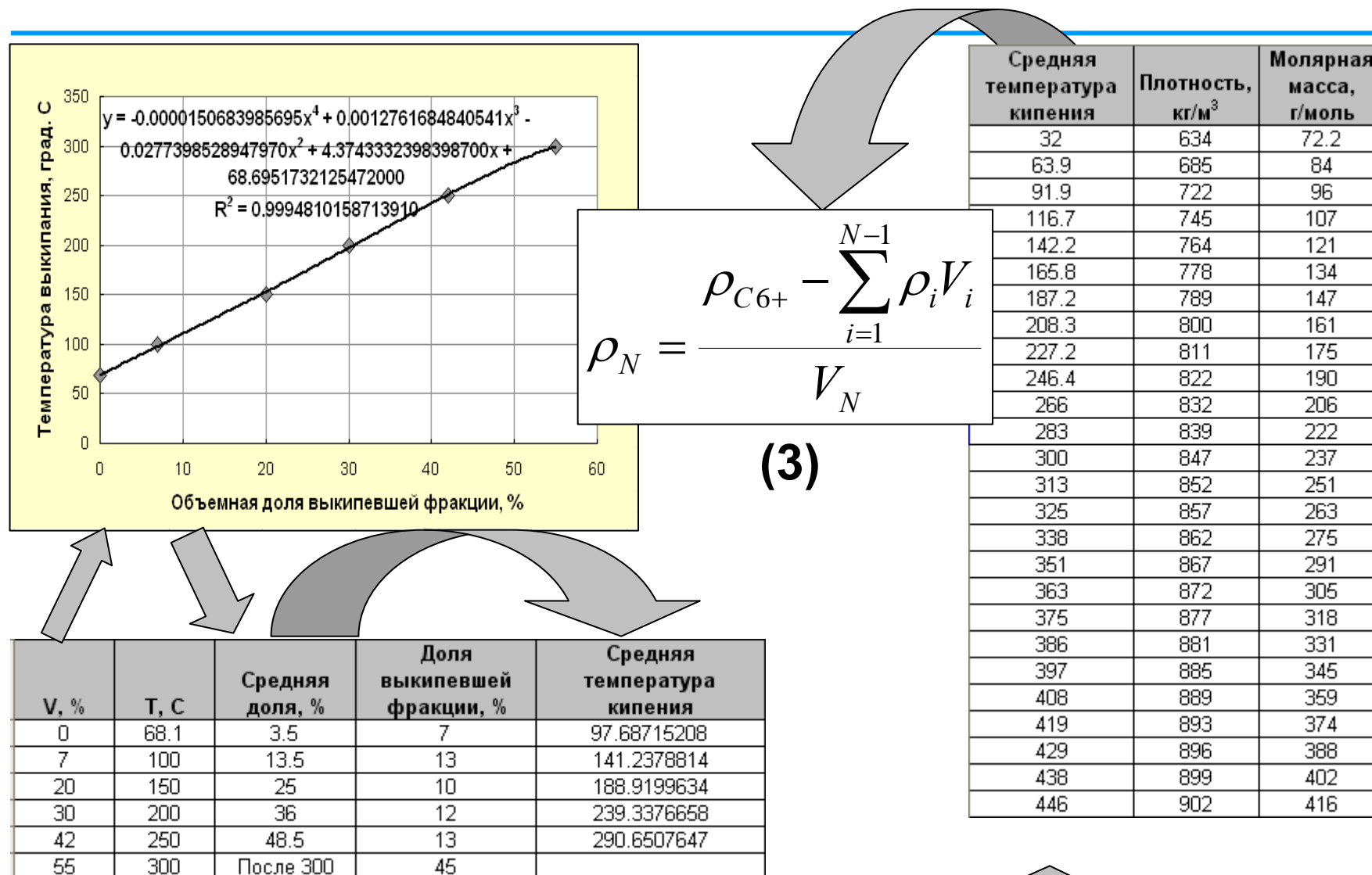
**Таблица 3 – Компонентный состав разгазированного флюида**

| Мнемоника | Название компонента | Молярная<br>концентрация,<br>% |
|-----------|---------------------|--------------------------------|
| CO2       | Диоксид углерода    | 0,00                           |
| N2        | Азот+редкие газы    | 0,00                           |
| C1        | Метан               | 0,48                           |
| C2        | Этан                | 0,61                           |
| C3        | Пропан              | 3,25                           |
| IC4       | Изо-бутан           | 2,17                           |
| NC4       | Н-бутан             | 7,48                           |
| IC5       | Изо-пентан          | 5,67                           |
| NC5       | Н-пентан            | 7,35                           |
| C6+       | Гексаны+высшие      | 72,99                          |
| M         | Молярная масса      | 204                            |

$$g_1 = \frac{x_1 M_1}{x_1 M_1 + x_{C6+} M_{C6+}}$$

$$g_{C6+} = \frac{x_{C6+} M_{C6+}}{x_1 M_1 + x_{C6+} M_{C6+}}$$

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка



## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка

$$g_i = \frac{\rho_i V_i}{\sum_{j=1}^N \rho_j V_j} \quad (4)$$

$$M_N = \frac{g_N}{\frac{1}{M_{C6+}} - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{g_i}{M_i}} \quad (5)$$

$$f_i = \frac{g_i / M_i}{\sum_{j=1}^N g_j / M_j} \quad (6)$$

$$x_{FRC,i} = f_i \cdot x_{C6+} \quad (7)$$

| Мнемо-ника | Название компонента | Молярная конц., % |
|------------|---------------------|-------------------|
| CO2        | Диоксид углерода    | 0,39              |
| N2         | Азот+редкие газы    | 0,87              |
| C1         | Метан               | 15,60             |
| C2         | Этан                | 2,20              |
| C3         | Пропан              | 5,53              |
| IC4        | Изо-бутан           | 2,06              |
| NC4        | Н-бутан             | 4,96              |
| IC5        | Изо-пентан          | 2,27              |
| NC5        | Н-пентан            | 3,06              |
| FRC1       | Псевдо фракция 1    | 8,60              |
| FRC2       | Псевдо фракция 2    | 14,15             |
| FRC3       | Псевдо фракция 3    | 9,18              |
| FRC4       | Псевдо фракция 4    | 9,01              |
| FRC5       | Псевдо фракция 5    | 8,12              |
| FRC6       | Псевдо фракция 6    | 14,05             |

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка

---

- ◆ Почему важно дробить остаток?

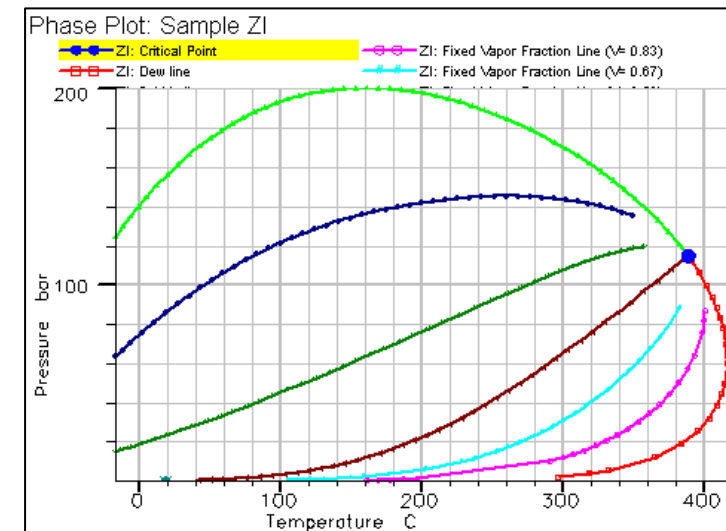
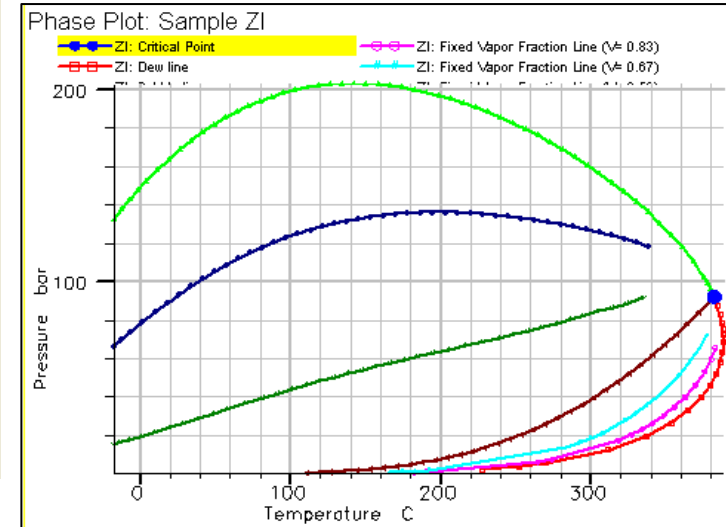
|     |     |
|-----|-----|
| C02 | 0.5 |
| N2  | 1.5 |
| C1  | 85  |
| C2  | 2   |
| C3  | 2   |
| IC4 | 2   |
| NC4 | 2   |
| IC5 | 1.5 |
| NC5 | 1.5 |
| C6+ | 2   |



# ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка

| Row | Components | Zi<br>(percent) | Weight fraction<br>(percent) | Mol Weight | Spec Gravity |
|-----|------------|-----------------|------------------------------|------------|--------------|
| 1   | N2         | 1.5             | 0.44033                      |            |              |
| 2   | CO2        | 0.5             | 0.23059                      |            |              |
| 3   | C1         | 35              | 5.8841                       |            |              |
| 4   | C2         | 2               | 0.63021                      |            |              |
| 5   | C3         | 2               | 0.92419                      |            |              |
| 6   | IC4        | 2               | 1.2182                       |            |              |
| 7   | NC4        | 2               | 1.2182                       |            |              |
| 8   | IC5        | 1.5             | 1.1341                       |            |              |
| 9   | NC5        | 1.5             | 1.1341                       |            |              |
| 10  | C6+        | 52              | 87.186                       | 160        | 0.84995      |

| Row | Components | Zi<br>(percent) | Weight fraction<br>(percent) | Mol Weight | Spec Gravity |
|-----|------------|-----------------|------------------------------|------------|--------------|
| 1   | N2         | 1.5             | 0.44033                      |            |              |
| 2   | CO2        | 0.5             | 0.23059                      |            |              |
| 3   | C1         | 35              | 5.8841                       |            |              |
| 4   | C2         | 2               | 0.63021                      |            |              |
| 5   | C3         | 2               | 0.92419                      |            |              |
| 6   | IC4        | 2               | 1.2182                       |            |              |
| 7   | NC4        | 2               | 1.2182                       |            |              |
| 8   | IC5        | 1.5             | 1.1341                       |            |              |
| 9   | NC5        | 1.5             | 1.1341                       |            |              |
| 10  | FRC1       | 7.4205          | 6.7737                       | 87.11      | 0.79024      |
| 11  | FRC2       | 14.08           | 16.045                       | 108.75     | 0.81434      |
| 12  | FRC3       | 14.745          | 23.149                       | 149.82     | 0.85045      |
| 13  | FRC4       | 10.603          | 23.941                       | 215.48     | 0.89335      |
| 14  | FRC5       | 5.1524          | 17.278                       | 320        | 0.94249      |



# ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка

Output Display - PVTi

File Edit

Expt BUBBLE1 : Bubble Point Pressure Calculation

Peng-Robinson (3-Parm) on ZI with PR corr.  
Lohrenz-Bray-Clark Viscosity Correlation

|                                  |       |          |
|----------------------------------|-------|----------|
| Specified temperature            | Deg K | 354.1500 |
| Calculated bubble point pressure | BARSA | 197.3871 |
| Observed bubble point pressure   | BARSA | 188.0000 |

|                    | Liquid     | Vapour     |
|--------------------|------------|------------|
| Fluid properties   | Calculated | Calculated |
| Mole Weight        | 95.4281    | 19.2608    |
| Z-factor           | 0.8838     | 0.9145     |
| Viscosity          | 0.2643     | 0.0194     |
| Density KG/M3      | 723.8297   | 141.1922   |
| Molar Vol M3/KG-ML | 0.1318     | 0.1364     |

| Molar Distributions |        | Total, Z | Liquid, X  | Vapour, Y  | K-Values   |
|---------------------|--------|----------|------------|------------|------------|
| Components          |        |          |            |            |            |
| Mnemonic            | Number | Measured | Calculated | Calculated | Calculated |
| N2                  | 1      | 1.5000   | 1.5000     | 6.7881     | 4.5254     |
| CO2                 | 2      | 0.5000   | 0.5000     | 0.6736     | 1.3472     |
| C1                  | 3      | 35.0000  | 35.0000    | 86.8359    | 2.4810     |
| C2                  | 4      | 2.0000   | 2.0000     | 1.9923     | 0.9962     |
| C3                  | 5      | 2.0000   | 2.0000     | 1.1759     | 0.5879     |
| IC4                 | 6      | 2.0000   | 2.0000     | 0.7946     | 0.3973     |
| NC4                 | 7      | 2.0000   | 2.0000     | 0.6507     | 0.3254     |
| IC5                 | 8      | 1.5000   | 1.5000     | 0.3439     | 0.2292     |
| NC5                 | 9      | 1.5000   | 1.5000     | 0.3029     | 0.2019     |
| C6+                 | 10     | 52.0000  | 52.0000    | 0.4421     | 0.0085     |
| Composition Total   |        | 100.0000 | 100.0000   | 100.0000   |            |

INS

Флюид в точке давления насыщения  
при НЕраздробленном остатке

# ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка

Output Display - PVTi

File Edit

Expt BUBBLE1 : Bubble Point Pressure Calculation

Peng-Robinson (3-Param) on ZI with PR corr.  
Lohrenz-Bray-Clark Viscosity Correlation

Specified temperature Deg K 354.1500

Calculated bubble point pressure BARSA 188.2576

Observed bubble point pressure BARSA 188.0000

| Fluid properties   | Liquid     | Vapour     |
|--------------------|------------|------------|
|                    | Calculated | Calculated |
| Mole Weight        | 95.4281    | 19.6178    |
| Z-factor           | 0.8341     | 0.9025     |
| Viscosity          | 0.2841     | 0.0191     |
| Density KG/M3      | 731.4692   | 138.9761   |
| Molar Vol M3/KG-ML | 0.1305     | 0.1412     |

| Molar Distributions |        | Total, Z | Liquid, X  | Vapour, Y  | K-Values   |
|---------------------|--------|----------|------------|------------|------------|
| Components          |        |          |            |            |            |
| Mnemonic            | Number | Measured | Calculated | Calculated | Calculated |
| N2                  | 1      | 1.5000   | 1.5000     | 6.6069     | 4.4046     |
| CO2                 | 2      | 0.5000   | 0.5000     | 0.6767     | 1.3534     |
| C1                  | 3      | 35.0000  | 35.0000    | 86.3159    | 2.4662     |
| C2                  | 4      | 2.0000   | 2.0000     | 1.9924     | 0.9962     |
| C3                  | 5      | 2.0000   | 2.0000     | 1.1753     | 0.5876     |
| IC4                 | 6      | 2.0000   | 2.0000     | 0.7902     | 0.3951     |
| NC4                 | 7      | 2.0000   | 2.0000     | 0.6507     | 0.3254     |
| IC5                 | 8      | 1.5000   | 1.5000     | 0.3421     | 0.2281     |
| NC5                 | 9      | 1.5000   | 1.5000     | 0.3017     | 0.2011     |
| FRC1                | 10     | 7.4205   | 7.4205     | 0.5279     | 0.0711     |
| FRC2                | 11     | 14.0797  | 14.0797    | 0.4766     | 0.0339     |
| FRC3                | 12     | 14.7446  | 14.7446    | 0.1309     | 0.0089     |
| FRC4                | 13     | 10.6029  | 10.6029    | 0.0124     | 0.0012     |
| FRC5                | 14     | 5.1524   | 5.1524     | 0.0004     | 6.8185E-05 |
| Composition Total   |        | 100.0000 | 100.0000   | 100.0000   |            |

INS

Флюид в точке давления насыщения  
при раздробленном остатке



## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка

|  |            |            |
|--|------------|------------|
| Standard pressure BARSA                  |            | 1.0132     |
| Standard temperature Deg C               |            | 15.5556    |
| Cumulative liquid mole fraction          |            | 0.5559     |
| Cumulative vapour mole fraction          |            | 0.4441     |
| Cumulative Surface volume oil M3         |            | 0.1014     |
| Cumulative Surface volume gas SM3        |            | 10.5196    |
| Cumulative GOR (Calculated) SM3/M3       |            | 103.4950   |
| Cumulative GOR (Observed ) SM3/M3        |            | 107.0000   |
| Oil FVF (from Phig) (Calculated) RM3/SM3 |            | 1.2900     |
| Oil FVF (from Phig) (Observed ) RM3/SM3  |            | 1.3060     |
| -----                                    |            |            |
| Fluid properties                         | Liquid     | Vapour     |
|  | Calculated | Calculated |
| Mole Weight                              |            | 153.6349   |
| Z-factor                                 |            | 0.0077     |
| Viscosity                                |            | 0.6199     |
| Density KG/M3                            |            | 842.2673   |
| Molar Vol M3/KG-ML                       |            | 0.1824     |
| -----                                    |            |            |
| Molar Distributions                      |            |            |
| Components                               |            |            |
| Mnemonic                                 | Number     | Measured   |
| N2                                       | 1          | 1.5000     |
| CO2                                      | 2          | 0.5000     |
| C1                                       | 3          | 35.0000    |
| C2                                       | 4          | 2.0000     |
| C3                                       | 5          | 2.0000     |
| IC4                                      | 6          | 2.0000     |
| NC4                                      | 7          | 2.0000     |
| IC5                                      | 8          | 1.5000     |
| NC5                                      | 9          | 1.5000     |
| C6+                                      | 10         | 52.0000    |
| Composition Total                        |            | 100.0000   |
| -----                                    |            |            |
| Liquid, X                                |            |            |
| Calculated                               |            |            |
| Vapour, Y                                |            |            |
| Calculated                               |            |            |
| K-Values                                 |            |            |
| Calculated                               |            |            |
| N2                                       |            | 3.3737     |
| CO2                                      |            | 1.1067     |
| C1                                       |            | 78.4643    |
| C2                                       |            | 4.3486     |
| C3                                       |            | 3.9707     |
| IC4                                      |            | 3.2888     |
| NC4                                      |            | 2.8780     |
| IC5                                      |            | 1.3885     |
| NC5                                      |            | 1.1373     |
| C6+                                      |            | 0.0433     |
| -----                                    |            |            |

Стандартная сепарация при  
НЕраздробленном остатке

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка

|  |  |          |
|--|--|----------|
| Standard pressure BARSA                  |  | 1.0132   |
| Standard temperature Deg C               |  | 15.5556  |
| Cumulative liquid mole fraction          |  | 0.5503   |
| Cumulative vapour mole fraction          |  | 0.4497   |
| Cumulative Surface volume oil M3         |  | 0.0989   |
| Cumulative Surface volume gas SM3        |  | 10.6533  |
| Cumulative GOR (Calculated) SM3/M3       |  | 107.4476 |
| Cumulative GOR (Observed ) SM3/M3        |  | 107.0000 |
| Oil FVF (from Phig) (Calculated) RM3/SM3 |  | 1.3059   |
| Oil FVF (from Phig) (Observed ) RM3/SM3  |  | 1.3060   |

| Fluid properties   |  | Liquid     | Vapour     |
|--------------------|--|------------|------------|
|                    |  | Calculated | Calculated |
| Mole Weight        |  | 154.2417   | 23.4567    |
| Z-factor           |  | 0.0076     | 0.9954     |
| Viscosity          |  | 0.7421     | 0.0104     |
| Density KG/M3      |  | 858.2335   | 0.9947     |
| Molar Vol M3/KG-ML |  | 0.1797     | 23.5812    |

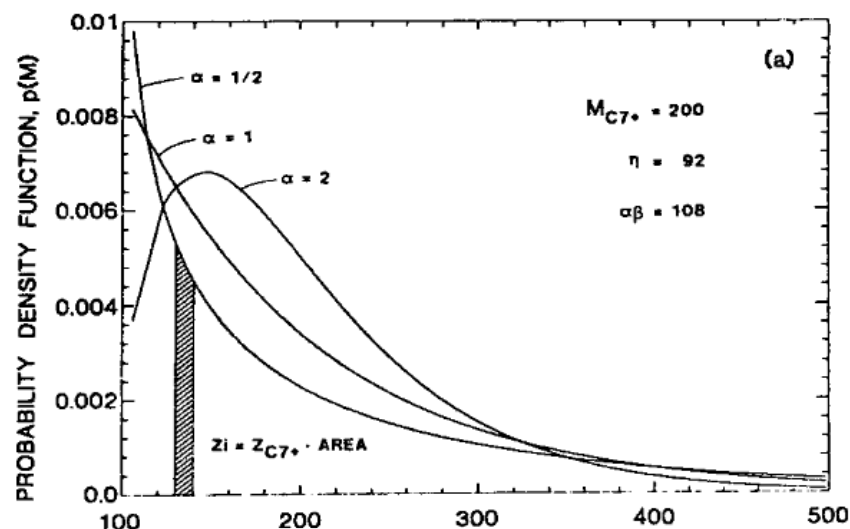
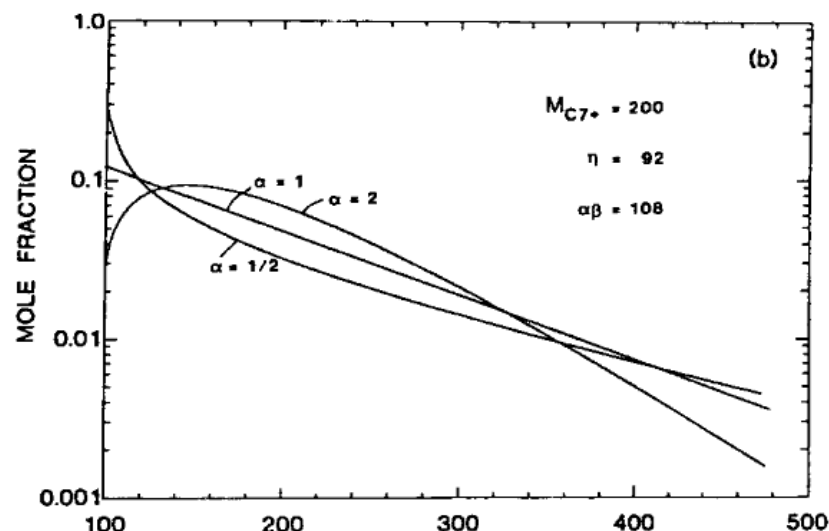
| Molar Distributions |        | Total, Z | Liquid, X  | Vapour, Y  | K-Values   |
|---------------------|--------|----------|------------|------------|------------|
| Components          |        |          |            |            |            |
| Mnemonic            | Number | Measured | Calculated | Calculated | Calculated |
| N2                  | 1      | 1.5000   | 0.0038     | 3.3309     | 876.9198   |
| CO2                 | 2      | 0.5000   | 0.0158     | 1.0926     | 69.2910    |
| C1                  | 3      | 35.0000  | 0.3005     | 77.4625    | 257.7696   |
| C2                  | 4      | 2.0000   | 0.1286     | 4.2901     | 33.3716    |
| C3                  | 5      | 2.0000   | 0.4398     | 3.9093     | 8.8887     |
| IC4                 | 6      | 2.0000   | 1.0054     | 3.2171     | 3.1997     |
| NC4                 | 7      | 2.0000   | 1.3292     | 2.8209     | 2.1223     |
| IC5                 | 8      | 1.5000   | 1.6257     | 1.3462     | 0.8281     |
| NC5                 | 9      | 1.5000   | 1.8240     | 1.1035     | 0.6050     |
| FRC1                | 10     | 7.4205   | 12.6070    | 1.0736     | 0.0852     |
| FRC2                | 11     | 14.0797  | 25.3066    | 0.3410     | 0.0135     |
| FRC3                | 12     | 14.7446  | 26.7835    | 0.0123     | 0.0005     |
| FRC4                | 13     | 10.6029  | 19.2673    | 5.0018E-05 | 2.5960E-06 |
| FRC5                | 14     | 5.1524   | 9.3628     | 1.6471E-08 | 1.7592E-09 |
| Composition Total   |        | 100.0000 | 100.0000   | 100.0000   |            |

Стандартная сепарация при  
раздробленном остатке

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка

| Характеристика флюида   | До дробления | После дробления | Отклонение от соответствующей величины после дробления, % |
|---|--------------|-----------------|---|
| <b>Воспроизведение эксперимента по определению давления насыщения</b>     |              |                 |   |
| Давление насыщения, МПа   | 197,3871     | 188,2576        | 4,85  |
| Мольная концентрация $C_{6+}$ при давлении насыщения, %                   | 0,4421       | 1,1482          | 61,50   |
| Плотность нефти при давлении насыщения, кг/м <sup>3</sup>                 | 723,8297     | 731,4692        | 1,04  |
| <b>Воспроизведение стандартной сепарации</b>                              |              |                 |   |
| Газосодержание при стандартной сепарации, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>  | 103,4950     | 107,4476        | 3,68  |
| Плотность нефти при стандартной сепарации, кг/м <sup>3</sup>              | 842,2673     | 858,2335        | 1,86  |
| Плотность выделившегося газа при стандартной сепарации, кг/м <sup>3</sup> | 0,9562       | 0,9947          | 3,87  |

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка. Метод Витсона



♦ Что делать, если нет фракционного состава?

Воспользоваться встроенной в PVTi функцией дробления остатка по Методу Витсона!



$$p(x) = \frac{(x - \eta)^{\alpha-1} \exp[-(x - \eta)/\beta]}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}$$

(8)

Рис.1. Иллюстрация модели вероятностного распределения для нескольких значений параметра  $\alpha$

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Дробление остатка. Метод Витсона

---

Особенности, о которых следует помнить при работе с методом Витсона:

- ◆ моделируемое распределение псевдо фракций не соответствует реальному;
- ◆ для настройки модели необходимо наличие экспериментальных данных;
- ◆ без экспериментальных данных, по которым можно откалибровать модель, успешный прогноз физико-химических свойств невозможен

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Наличие экспериментов

---

Кроме отбора представительных данных для построения модели следует также обращать внимание на наличие информации о проведенных экспериментах. Для построения надежной модели требуется иметь ряд экспериментальных исследований;

**для нефти:**

- ◆ измерение давления насыщения;
- ◆ стандартная сепарация нефти;
- ◆ дифференциальное разгазирование;
- ◆ данные о степенях сепарации в рабочих условиях на промысле;

**для газа:**

- ◆ измерение давления начала конденсации;
- ◆ дифференциальная конденсация;
- ◆ данные о степенях сепарации на промысле.

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ: Закрепление материала

---

- ◆ Основы процедуры отбраковки проб
- ◆ Дробление остатка на основе фракционного состава
- ◆ Необходимость дробления тяжелого остатка