

Расчет дебита фильтрующейся жидкости для различных видов пористости

1. Оценка дебита жидкости при линейном режиме равномерной фильтрации

Теория к разделу

Рассмотрим случай субкапиллярной фильтрации, т.е. фильтрация равномерная и проходит через всю площадь образца, имеющего субкапиллярную пористость.

Дебит жидкости при линейном режиме оценивается *уравнением Дарси*:

$$Q = k_{np} \cdot F \frac{\Delta P}{\mu \cdot L}, \quad (3.1)$$

где k_{np} – проницаемость, Д;
 F – площадь фильтрации, см²;
 ΔP – перепад давления, атм;
 μ – вязкость, спз;
 L – длина, см.

1.1. Типовая задача

Дан кубик породы размером 10x10x10 см, имеющий проницаемость 10 мД, через который фильтруется жидкость вязкостью 1 спз при градиенте давления ($\Delta P/L$), равном 0,25 атм/м. Определить дебит жидкости.

Дано:

$$k_{np} = 10 \text{ мД} = 0,01 \text{ Д};$$

$$F = 100 \text{ см}^2;$$

$$\Delta P/L = 0,25 \text{ атм/м} = 0,0025 \text{ атм/см};$$

$$\mu = 1 \text{ спз}.$$

Найти: Q_1

Решение:

$$Q_1 = k_{np} \cdot F \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot L},$$

$$Q_1 = 0,01 \cdot 100 \cdot \frac{0,0025}{1} = 0,0025 \text{ см}^3/\text{с}.$$

2. Оценка дебита жидкости при неравномерно-проницаемой фильтрации

Теория к разделу

Проницаемость жидкости при фильтрации через капилляр оцениваем из соотношения уравнений Дарси:

$$Q = k_{np, кап} \cdot F \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot L} \quad (3.2)$$

и Пуазейля:

$$Q = \frac{F \cdot r^2 \cdot \Delta P}{8 \cdot \mu \cdot L}, \quad (3.3)$$

откуда:

$$k_{np, кап} = \frac{r^2}{8}, \quad (3.4)$$

где $k_{np, кап}$ – проницаемость при фильтрации жидкости через капилляр, Д;
 F – площадь фильтрации, см²;
 ΔP – перепад давления, атм;
 μ – вязкость, спз;
 L – длина, см.

После преобразования коэффициента проницаемости и радиуса капилляра к одной размерности получим эмпирическое уравнение для оценки коэффициента проницаемости при фильтрации жидкости через капилляр:

$$k_{np, кап} = 12,5 \cdot 10^6 \cdot r^2. \quad (3.5)$$

2.1. Типовая задача

Дан кубик породы размером 10x10x10 см, имеющий проницаемость 10 мДарси, через который фильтруется жидкость вязкостью 1 спз при градиенте давления ($\Delta P/L$), равном 0,25 атм/м. В этом кубике существует один капилляр диаметром 0,2 мм. На сколько увеличится суммарный дебит при прочих равных параметрах μ и $\Delta P/L$?

Дано:

$$D_k = 0,2 \text{ мм} = 0,02 \text{ см};$$

$$\Delta P/L = 0,25 \text{ атм/м} = 0,0025 \text{ атм/см};$$

$$\mu = 1 \text{ спз};$$

$$N_k = 1.$$

Найти: Q_2 - дебит при фильтрации через капилляр;

Q_3 - суммарный дебит за счёт субкапиллярной и капиллярной фильтрации.

Решение:

$$Q_2 = N_k \cdot k_{np,kan} \cdot F \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot L},$$

$$k_{np,kan} = 12,5 \cdot 10^6 \cdot r^2, \quad r = \frac{D_k}{2},$$

$$F = \pi \cdot r^2.$$

Рассчитаем дебит через этот капилляр:

$$Q_2 = 1 \cdot 12,5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{0,02}{2}\right)^2 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{0,02}{2}\right)^2 \cdot \frac{0,0025}{1} = 0,001 \text{ см}^3/\text{с},$$

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = 0,0025 + 0,001 = 0,0035 \text{ см}^3/\text{с}.$$

По сравнению с субкапиллярной проницаемостью ($k_{пр} = 10$ мД) дебит увеличится при наличии одного такого канала на 40% (Q_2 / Q_1), а если бы субкапиллярная проницаемость была $k_{пр} = 1$ мД, то дебит увеличился бы на 400% ($Q_2 / Q_1 \cdot k_{пр}$).

3. Оценка дебита жидкости при наличии трещиноватой фильтрации

Теория к разделу

Допустим, в кубике с субкапиллярной проницаемостью вместо канала имеется трещина вдоль всего образца шириной $L_{тр}$, высотой $h_{тр}$. Оценить проницаемость трещины (щели) для жидкости, фильтрующейся через образец, можно, используя соотношение уравнений Буссинеска и Дарси:

$$\Delta P = \frac{12 \cdot \mu \cdot v \cdot L_{mp}}{h_{mp}^2}, \quad (3.6)$$

$$\Delta P = \frac{v \cdot \mu \cdot L_{mp}}{k_{np,mp}}, \quad (3.7)$$

где $k_{np,тр}$ – проницаемость при наличии трещиноватой фильтрации, Д;
 v – линейная скорость движения жидкости, см/с;
 ΔP – перепад давления, атм;
 μ – вязкость, спз;
 $L_{тр}$ – ширина трещины, см;
 $h_{тр}$ – высота трещины, см.

Приведя параметры к одной размерности в единицах измерения нефтепромысловой геологии, получим эмпирическое уравнение для оценки коэффициента проницаемости при трещиноватой фильтрации:

$$k_{np,mp} = 84,4 \cdot 10^5 \cdot h^2. \quad (3.8)$$

3.1. Типовая задача

Дан кубик породы размером 10x10x10 см, имеющий проницаемость 10 мДарси, через который фильтруется жидкость вязкостью 1 спз при градиенте давления ($\Delta P/L$), равном 0,25 атм/м. В этом кубике будет существовать одна трещина шириной 10 см, высотой 0,2 мм. На сколько увеличится суммарный дебит при прочих равных параметрах μ и $\Delta P/L$?

Дано:

$$h_{тр} = 0,2 \text{ мм} = 0,02 \text{ см};$$

$$\Delta P/L = 0,25 \text{ атм/м} = 0,0025 \text{ атм/см};$$

$$\mu = 1 \text{ спз};$$

$$L_{тр} = 10 \text{ см};$$

$$M_{тр} = 1.$$

Найти: Q_4 - дебит при фильтрации через трещину;

Q_5 - суммарный дебит жидкости за счет субкапиллярной и трещиноватой фильтрации.

Решение:

$$Q_4 = M_{тр} \cdot k_{пр,тр} \cdot F \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot L},$$

$$k_{пр,тр} = 84,4 \cdot 10^5 \cdot h^2,$$

$$F = h \cdot L_{тр}.$$

$$Q_4 = 1 \cdot 84,4 \cdot 10^5 \cdot 0,02^2 \cdot 0,02 \cdot 10 \cdot \frac{0,0025}{1} = 1,688 \text{ см}^3 / \text{с},$$

а суммарный дебит с учетом субкапиллярной фильтрации:

$$Q_5 = Q_4 + Q_1 = 1,688 + 0,0025 = 1,6905 \text{ см}^3 / \text{с}.$$

Сравнивая дебиты Q_4 и Q_1 , получим, что наличие общей трещины приводит к увеличению дебита в 675 раз ($1,688 / 0,0025$).

4. Задания для самостоятельной работы

Дан кубик породы размером 10x10x10 см. Определить дебиты (Q_1), (Q_2), (Q_3), (Q_4), (Q_5) при:

1. равномерной субкапиллярной и неравномерно-проницаемой фильтрациях;

2. равномерной субкапиллярной и трещиноватой фильтрациях

и сравнить их для условий, представленных в таблице 3.1, имеющих следующие обозначения:

$k_{пр}$ – проницаемость при субкапиллярной фильтрации, мД;

μ – вязкость жидкости, спз;

$\Delta P/L$ – перепад давления, атм/м;

N_k – число капилляров;

D_k – диаметр капилляра, мм;

$L_{тр}$ – длина трещин, см;

$h_{тр}$ – высота трещины, мм;

$M_{тр}$ – число трещин;

1, ..., 120 – номер варианта.

Таблица 1 – Исходные данные

<i>B</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
<i>k_{np}</i>	8	12	10	11	15	9	18	13	14	10	11
<i>μ</i>	2,0	1,3	3,0	2,5	3,0	1,5	2,0	1,3	3,0	1,2	1,4
<i>ΔP/L</i>	0,3	0,26	0,31	0,32	0,33	0,35	0,3	0,36	0,31	0,28	0,26
<i>N_k</i>	1	2	1	2	3	2	1	3	2	1	3
<i>D_k</i>	0,18	0,2	0,22	0,24	0,25	0,16	0,3	0,27	0,28	0,24	0,16
<i>L_{тр}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>h_{тр}</i>	0,15	0,16	0,18	0,17	0,19	0,22	0,21	0,28	0,27	0,28	0,23
<i>M_{тр}</i>	2	1	2	1	1	2	2	1	2	2	1
<i>B</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>20</i>	<i>21</i>	<i>22</i>
<i>k_{np}</i>	13	17	20	12	13	11	9	13	16	17	8
<i>μ</i>	1,8	2,0	2,2	2,5	3,0	2,8	2,2	1,1	1,3	1,1	1,8
<i>ΔP/L</i>	0,3	0,24	0,22	0,23	0,26	0,25	0,3	0,36	0,26	0,27	0,24
<i>N_k</i>	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1
<i>D_k</i>	0,15	0,22	0,23	0,24	0,33	0,28	0,26	0,3	0,18	0,19	0,21
<i>L_{тр}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>h_{тр}</i>	0,22	0,21	0,23	0,19	0,22	0,23	0,25	0,26	0,27	0,28	0,22
<i>M_{тр}</i>	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<i>B</i>	<i>23</i>	<i>24</i>	<i>25</i>	<i>26</i>	<i>27</i>	<i>28</i>	<i>29</i>	<i>30</i>	<i>31</i>	<i>32</i>	<i>33</i>
<i>k_{np}</i>	9	12	13	10	11	9	15	14	16	11	17
<i>μ</i>	1,6	1,9	2,0	3,0	1,4	1,8	1,6	2,2	2,0	2,1	1,3
<i>ΔP/L</i>	0,2	0,22	0,24	0,25	0,31	0,32	0,28	0,24	0,25	0,28	0,31
<i>N_k</i>	2	1	2	1	2	3	2	1	1	2	3
<i>D_k</i>	0,22	0,23	0,25	0,26	0,27	0,28	0,3	0,31	0,29	0,28	0,18
<i>L_{тр}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>h_{тр}</i>	0,24	0,26	0,28	0,16	0,25	0,26	0,27	0,18	0,23	0,24	0,22
<i>M_{тр}</i>	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1

Продолжение таблицы 1

<i>B</i>	<i>34</i>	<i>35</i>	<i>36</i>	<i>37</i>	<i>38</i>	<i>39</i>	<i>40</i>	<i>41</i>	<i>42</i>	<i>43</i>	<i>44</i>
<i>k_{np}</i>	9	20	13	17	9	16	18	19	15	12	13
<i>μ</i>	1,6	1,7	3,0	1,6	1,8	1,9	2,8	3,0	2,0	2,0	1,3
<i>ΔP/L</i>	0,4	0,28	0,35	0,37	0,39	0,4	0,22	0,28	0,3	0,28	0,24
<i>N_k</i>	2	1	2	1	2	3	2	1	1	1	2
<i>D_k</i>	0,22	0,26	0,3	0,31	0,28	0,29	0,26	0,2	0,25	0,18	0,2
<i>L_{тр}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>h_{тр}</i>	0,2	0,26	0,26	0,28	0,29	0,3	0,18	0,26	0,24	0,27	0,18
<i>M_{тр}</i>	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	2
<i>B</i>	<i>45</i>	<i>46</i>	<i>47</i>	<i>48</i>	<i>49</i>	<i>50</i>	<i>51</i>	<i>52</i>	<i>53</i>	<i>54</i>	<i>55</i>
<i>k_{np}</i>	11	9	13	16	17	8	9	12	13	10	11
<i>μ</i>	3,0	2,5	3,0	1,5	2	1,3	3,0	1,2	1,4	1,8	2,0
<i>ΔP/L</i>	0,25	0,28	0,31	0,4	0,28	0,35	0,37	0,39	0,4	0,22	0,28
<i>N_k</i>	1	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
<i>D_k</i>	0,22	0,24	0,25	0,16	0,3	0,27	0,28	0,24	0,16	0,15	0,22
<i>L_{тр}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>h_{тр}</i>	0,23	0,24	0,22	0,2	0,26	0,26	0,28	0,29	0,3	0,18	0,26
<i>M_{тр}</i>	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2
<i>B</i>	<i>56</i>	<i>57</i>	<i>58</i>	<i>59</i>	<i>60</i>	<i>61</i>	<i>62</i>	<i>63</i>	<i>64</i>	<i>65</i>	<i>66</i>
<i>k_{np}</i>	9	8	12	10	11	15	9	18	13	14	10
<i>μ</i>	2,2	2,5	3,0	2,8	2,2	1,1	1,3	1,1	1,8	1,6	1,9
<i>ΔP/L</i>	0,3	0,23	0,26	0,25	0,3	0,36	0,26	0,27	0,24	0,2	0,22
<i>N_k</i>	1	2	1	1	2	3	2	1	2	1	2
<i>D_k</i>	0,23	0,24	0,33	0,28	0,26	0,3	0,22	0,19	0,21	0,22	0,23
<i>L_{тр}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>h_{тр}</i>	0,24	0,15	0,16	0,18	0,17	0,19	0,18	0,21	0,28	0,27	0,28
<i>M_{тр}</i>	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2

Продолжение таблицы 1

<i>B</i>	<i>67</i>	<i>68</i>	<i>69</i>	<i>70</i>	<i>71</i>	<i>72</i>	<i>73</i>	<i>74</i>	<i>75</i>	<i>76</i>	<i>77</i>
<i>k_{np}</i>	11	13	17	20	15	14	16	11	17	9	20
<i>μ</i>	2,0	3,0	1,4	1,8	1,6	2,2	2,0	2,1	1,3	1,6	1,7
<i>ΔP/L</i>	0,24	0,25	0,31	0,32	0,3	0,26	0,31	0,32	0,33	0,35	0,3
<i>N_k</i>	3	2	1	1	2	2	2	1	2	1	2
<i>D_k</i>	0,25	0,26	0,27	0,28	0,3	0,31	0,29	0,28	0,18	0,2	0,26
<i>L_{тр}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>h_{тр}</i>	0,23	0,22	0,21	0,23	0,19	0,22	0,23	0,25	0,26	0,27	0,28
<i>M_{тр}</i>	1	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2
<i>B</i>	<i>78</i>	<i>79</i>	<i>80</i>	<i>81</i>	<i>82</i>	<i>83</i>	<i>84</i>	<i>85</i>	<i>86</i>	<i>87</i>	<i>88</i>
<i>k_{np}</i>	17	9	16	18	19	15	12	13	8	12	10
<i>μ</i>	3	2,8	2,2	1,1	1,3	1,1	1,8	1,6	1,3	3	2,5
<i>ΔP/L</i>	0,28	0,31	0,4	0,28	0,35	0,37	0,39	0,4	0,3	0,32	0,33
<i>N_k</i>	1	2	3	2	1	2	1	2	2	3	2
<i>D_k</i>	0,26	0,3	0,18	0,19	0,21	0,22	0,23	0,25	0,25	0,16	0,3
<i>L_{тр}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>h_{тр}</i>	0,23	0,24	0,22	0,2	0,26	0,26	0,28	0,29	0,21	0,28	0,27
<i>M_{тр}</i>	2	1	1	1	2	1	2	1	1	2	2
<i>B</i>	<i>89</i>	<i>90</i>	<i>91</i>	<i>92</i>	<i>93</i>	<i>94</i>	<i>95</i>	<i>96</i>	<i>97</i>	<i>98</i>	<i>99</i>
<i>k_{np}</i>	11	15	9	18	13	14	10	11	13	17	13
<i>μ</i>	3	1,5	2	1,3	3	1,2	1,4	1,8	2	2,2	2,8
<i>ΔP/L</i>	0,35	0,3	0,36	0,31	0,28	0,26	0,3	0,24	0,22	0,23	0,3
<i>N_k</i>	1	3	2	1	3	2	1	1	2	1	2
<i>D_k</i>	0,27	0,28	0,24	0,16	0,15	0,22	0,23	0,24	0,33	0,28	0,18
<i>L_{тр}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>h_{тр}</i>	0,28	0,23	0,22	0,21	0,23	0,19	0,22	0,25	0,25	0,26	0,22
<i>M_{тр}</i>	1	1	2	2	1	2	1	1	1	2	1

Продолжение таблицы 1

<i>B</i>	<i>100</i>	<i>101</i>	<i>102</i>	<i>103</i>	<i>104</i>	<i>105</i>	<i>106</i>	<i>107</i>	<i>108</i>	<i>109</i>	<i>110</i>
<i>k_{np}</i>	11	9	13	16	17	8	12	16	11	17	9
<i>μ</i>	2,2	1,1	1,3	1,1	1,8	1,6	2	2,1	1,3	1,6	1,7
<i>ΔP/L</i>	0,36	0,26	0,27	0,24	0,2	0,22	0,25	0,31	0,4	0,28	0,35
<i>N_k</i>	1	2	1	2	1	2	2	2	1	2	1
<i>D_k</i>	0,19	0,21	0,22	0,23	0,25	0,26	0,28	0,26	0,3	0,31	0,28
<i>L_{гp}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<i>h_{гp}</i>	0,24	0,26	0,28	0,16	0,28	0,25	0,18	0,28	0,29	0,3	0,18
<i>M_{гp}</i>	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2
<i>B</i>	<i>111</i>	<i>112</i>	<i>113</i>	<i>114</i>	<i>115</i>	<i>116</i>	<i>117</i>	<i>118</i>	<i>119</i>	<i>120</i>	
<i>k_{np}</i>	11	11	10	12	8	9	11	12	9	12	
<i>μ</i>	2	2,8	3	2,5	2,2	2	1,8	3	1,3	2	
<i>ΔP/L</i>	0,26	0,26	0,23	0,3	0,28	0,22	0,4	0,35	0,28	0,25	
<i>N_k</i>	1	2	1	1	2	3	1	1	2	2	
<i>D_k</i>	0,24	0,23	0,22	0,15	0,16	0,24	0,28	0,21	0,25	0,29	
<i>L_{гp}</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
<i>h_{гp}</i>	0,22	0,18	0,3	0,28	0,28	0,26	0,22	0,27	0,24	0,28	
<i>M_{гp}</i>	2	1	2	2	1	2	1	1	1	2	